

## PREVISÃO DA POPULAÇÃO E ARRANJO ESPACIAL DE PLANTAS DE MILHO EM FUNÇÃO DA ARQUITETURA DA COPA E DA LOCALIZAÇÃO DA CULTURA

PEDRO ABEL VIEIRA JUNIOR<sup>1</sup>, DURVAL DOURADO NETO<sup>2</sup>, MARCOS SILVEIRA BERNARDES<sup>2</sup>, PAULO AUGUSTO MANFRON<sup>3</sup>; ARNO KRENZINGER<sup>4</sup>; CARLOS RODRIGUES PEREIRA<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Pesquisador, M.Sc., Embrapa SNT EN Sete Lagoas, C.P. 151, CEP 35701-970 Sete Lagoas, MG. [pavieira@cnpmc.embrapa.br](mailto:pavieira@cnpmc.embrapa.br) (autor para correspondência)

<sup>2</sup>Prof. Associado, Dr., Departamento de Produção Vegetal, ESALQ/USP. C.P. 9, CEP 13418-900 Piracicaba, SP. Bolsista CNPq. [dourado@carpa.ciagri.usp.br](mailto:dourado@carpa.ciagri.usp.br), [msbernar@ciagri.usp.br](mailto:msbernar@ciagri.usp.br)

<sup>3</sup>Prof. Titular, Dr., Departamento de Fitotecnia, UFSM. CEP 97105-900 Santa Maria, RS. [manfrop@ufsm.br](mailto:manfrop@ufsm.br)

<sup>4</sup>Prof., PhD., Departamento de Engenharia de Materiais, UFRGS, Av. Osvaldo Aranha, 99/711. CEP 90040-020 Porto Alegre, RS. Bolsista CNPq. [arno@mecanica.ufrgs.br](mailto:arno@mecanica.ufrgs.br)

<sup>5</sup>Eng. Agrônomo, Dr. Bolsista Recém Doutor, ESALQ/USP, Piracicaba, SP.

*Revista Brasileira de Milho e Sorgo, v.4, n.3, p.404-417, 2005*

**RESUMO** - A população e a distribuição espacial de plantas na cultura do milho são importantes para a interceptação da radiação, a qual é fundamental para o rendimento. A interceptação da radiação é função da latitude do local, do dia do ano, da hora do dia e do ângulo foliar. Não se dispõe de metodologia para previsão da melhor população e distribuição espacial de plantas em função da arquitetura da copa, sendo ambos, em geral, determinados por experimentação em campo. Também não se dispõe de metodologia para previsão do ângulo foliar que maximize a interceptação da radiação. Os objetivos do trabalho foram propor equações e metodologias para previsão da população e da distribuição espacial de plantas em função da arquitetura da copa, bem como de ângulos foliares que maximizem a interceptação da radiação em função do local e do dia do ano. A metodologia proposta deve ser validada pela comparação dos resultados de rendimento obtidos de genótipos com diferentes arquiteturas de copa e cultivados em diferentes latitudes e períodos do ano.

**Palavras-chave:** *Zea mays*, população de plantas, arquitetura do dossel, índice de área foliar.

## FORECAST OF THE POPULATION AND SPATIAL ARRANGEMENT OF MAIZE DUE TO CANOPY ARCHITECTURE AND CROP LOCALIZATION

**ABSTRACT** - The plant population and space distribution in maize are important for the interception of solar radiation, which is very important to the yield. Radiation interception is consequence of the latitude, the day of the year, the hour of the day and foliar angle. There was no methodology for estimating the best plant population and space distribution considering the canopy architecture, being both obtained through experimentation in field. There was neither methodology for estimating the foliar angle which maximizes the radiation interception. The purpose of this paper was to propose equations and methodologies for estimating the plant population and space distribution considering the canopy architecture, as well as foliar angles that maximize the interception of the

radiation in consequence of the latitude and the day of the year. The methodology described should be validated by the comparison of the yield of cultivar with different canopy architectures grown in different latitudes and periods of the year.

**Key-words:** *Zea mays*, plant population, canopy architecture, foliar index.

Analisando-se os avanços obtidos na agricultura mundial, verifica-se que os incrementos de rendimentos nas principais espécies vegetais cultivadas não são decorrentes da melhoria na produção fotossintética, mas, sim, da melhor partição de fotoassimilados, com ênfase às partes de aproveitamento econômico, pois cultivares antigas apresentam produção biológica bastante próxima às cultivares recentes (Machado, 1985; Austin *et al.* 1989; Andrade *et al.*, 1991; Duvick, 1992).

A melhoria do processo de fotossíntese é complexa e apresenta como principal limitação o fato de a enzima Rubisco apresentar afinidade tanto a CO<sub>2</sub> quanto a O<sub>2</sub>, o que foi vantagem nos primórdios da vida, quando a atmosfera era rica em CO<sub>2</sub>. Apesar da reduzida alteração da enzima Rubisco, fato que demonstra a complexidade para a melhoria de eficiência da fotossíntese, a evolução das espécies resultou em mecanismos de concentração de CO<sub>2</sub>, a exemplo de plantas C4, em que a enzima PEP apresenta afinidade apenas a CO<sub>2</sub>. As plantas C4, tendo o milho como exemplo, desenvolveram processos que otimizam a fixação de CO<sub>2</sub> e, conseqüentemente, a utilização de água e de nitrogênio, além de sua produção fotossintética, em condições naturais, não apresentar saturação à radiação (Dourado Neto *et al.*, 2001; Horton, 2000; Vieira Júnior, 1999, Andrade *et al.*, 1991).

Considerando as dificuldades inerentes à melhoria no processo de fixação do CO<sub>2</sub>, sugerem-se alterações na arquitetura do dossel<sup>1</sup>, com

ênfase na otimização da interceptação e uso pela fotossíntese da radiação (Larcher, 1995; Machado, 1995; Sachulze & Caldwell, 1995; Horton, 2000).

A transmissão da luz no dossel está relacionada com a transmitância pelas folhas, com a área foliar acumulada na profundidade do dossel e com a profundidade do dossel, sendo que a fotossíntese potencial se reduz diretamente com relação à profundidade no dossel. A transmitância pelas folhas é determinada, principalmente, pelas características óticas do mesofilo e pela concentração e disposição dos cloroplastos, sendo variável entre os indivíduos, como conseqüência do ambiente de crescimento das plantas (Horton, 2000; Terashima, 1989).

O número total e a distribuição vertical das folhas no dossel são variáveis entre e dentro das espécies, como resultado da adaptação ao meio. Cita-se, como exemplo, que, no milho, as folhas situadas acima da inserção da espiga têm maior participação relativa no rendimento de grãos que as situadas abaixo, sendo descrito, em alguns casos, que o par de folhas imediatamente acima do solo apresenta metabolismo C3. As folhas devem estar distribuídas de modo a estabelecer camadas verticais, sendo que as folhas da camada superior devem dispor de aparato fotossintético apto às radiações de maior comprimento de onda e as camadas inferiores devem ser aptas aos comprimentos transmitidos pelas camadas superiores. Estudos sugerem que a distância vertical entre folhas deve ser, no mínimo,

<sup>1</sup> Entende-se por arquitetura do dossel a disposição, as dimensões, a forma e o ângulo das folhas em relação ao plano horizontal.

igual ao dobro do comprimento da folhas. Apesar da importância do fator, no caso do milho, há carência de estudos determinando a transmitância e a refletância da radiação no dossel (Andrade *et al.*, 1991; Vieira Júnior, 1999; Boedhram *et al.*, 2001; Dourado Neto *et al.*, 2001).

O estabelecimento de camadas de folhas no dossel, ou seja, área foliar por área de solo ocupada pela planta ( $\text{cm}^2$  folha  $\text{cm}^{-2}$  de solo), denominado índice de área foliar (IAF), é resultado da disposição espacial das folhas, a qual é consequência da distribuição espacial das plantas. Estudos demonstram que a produção fotossintética não aumenta linearmente com o IAF, sendo limitada pela sobreposição, a qual é mínima durante a fase inicial das culturas. No caso do milho, o IAF ótimo, quando considerada a produção de grãos, é entre 5 e 7, com maior frequência de 6 (San Pietro *et al.*, 1969; Gifford & Evans, 1981; Sachulze & Caldwell, 1995; Stewart & Dwyer, 1999; Vieira Júnior, 1999; Pommel *et al.*, 2002).

O milho apresenta folhas alternadas e opostas ao longo do perfil da planta, com seus posicionamentos no colmo definidos durante a organogênese, o que lhe confere uma projeção de copa elíptica. Na cultura do milho, normalmente, a distribuição espacial das plantas não é aleatória, sendo distribuídas em linhas espaçadas regularmente. O posicionamento das folhas no colmo definido na organogênese sugere, portanto, que a orientação azimutal das folhas, traduzida como a orientação das folhas em relação à linha de semeadura, é resultado do posicionamento da semente na semeadura. Entretanto, estudos com vários genótipos e sistemas de semeadura demonstram não haver uma distribuição ao acaso do azimute das folhas, independente do padrão de semeadura, como resultado da habilidade da planta em modificar a

orientação das folhas (Larcher, 1995; Stewart & Dwyer, 1999; Vieira Jr, 1999; Maddonni *et al.*, 2000; Pommel *et al.*, 2002). Em geral, 70% das folhas apresentam o eixo maior da projeção elíptica com desvio máximo de 20° em relação à normal da linha de semeadura, como resultado da plasticidade morfológica da espécie (Maddonni *et al.*, 2000; Maddonni *et al.*, 2001).

Considerando a importância do IAF e da distribuição espacial de plantas na linha e na entrelinha da cultura do milho, Dourado Neto *et al.* (2001) propuseram, para distribuição hexagonal das plantas, as equações 1 a 4, nas quais P ( $\text{pl ha}^{-1}$ ) refere-se à população de plantas, para estimar a distância ( $e_1$ , m) entre as plantas na linha de semeadura (Equação 1), a distância ( $e_2$ , m) entre as linhas (Equação 2), a área útil ( $A_u$ ,  $\text{m}^2 \text{pl}^{-1}$ ) explorada por planta (Equação 3) e a área bruta ( $A_p$ ,  $\text{m}^2 \text{pl}^{-1}$ ) explorada por planta (Equação 4).

$$e_1 = \frac{20}{3^{\frac{1}{4}}} \left( \frac{50}{P} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{(Equação 1)}$$

$$e_2 = 10 \times 3^{\frac{1}{4}} \left( \frac{50}{P} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{(Equação 2)}$$

$$A_u = \frac{5000\pi\sqrt{3}}{3P} \quad \text{(Equação 3)}$$

$$A_p = \frac{10000}{P} \quad \text{(Equação 4)}$$

Entretanto, considerando a distribuição vertical das folhas no colmo formando camadas, a maximização do IAF será obtida com plantas espaçadas regularmente com o eixo maior da elipse da projeção da copa normal à linha e com os bordos das folhas contíguos, ou seja, as medidas da linha e da entrelinha devem

considerar as dimensões das folhas (Stewart & Dwyer, 1999).

O ângulo de inserção foliar, ângulo formado entre a superfície adaxial da folha e o colmo da planta, afeta a interceptação da radiação pelas folhas e, conseqüentemente, a penetração da radiação no dossel. Teoricamente, o ângulo foliar ideal é aquele que posiciona as superfícies adaxiais das folhas perpendiculares à direção da radiação, pois simulações demonstram que, em baixas latitudes, copas planas e estreitas apresentam maior eficiência na interceptação da radiação, enquanto, em latitudes maiores que 50°, copas estreitas e verticalmente longas foram mais eficientes (Kellomaki *et al.*, 1985; Kiniry *et al.*, 2002; Pukkala & Kuuluvainen, 1987).

No milho, são observadas diferenças no ângulo foliar entre genótipos, sendo considerado que a espécie não apresenta movimentos heliotrópicos na folha; entretanto, verifica-se que as plantas de mesmo genótipo apresentam variações diaheliotrópicas<sup>2</sup> nos ângulos foliares de até 20°, segundo o local e a época de cultivo, demonstrando plasticidade morfológica dessa característica para espécie (Sailaja *et al.*, 1997; Maddoni, 2001).

O ângulo da radiação solar sobre um plano horizontal em um dado ponto da superfície terrestre pode ser estimado pelo ângulo zenital ( $Z$ , °) (Equação 5), que é resultado da posição da terra em relação ao sol, variando segundo o local, definido pela latitude ( $f$ , °), o ângulo entre o raio vetor do sol e o plano do equador terrestre, denominado declinação ( $d$ , °) (Equação 6), em que  $n$  refere-se ao dia juliano, variando entre 1 e 365, e a hora do dia, definida pelo ângulo horário ( $h$ , °) e estimada pela equação 7 (Vianello, 2000).

$$\cos Z = \sin \varphi . \sin \delta + \cos \varphi . \cos \delta . \cos h \quad (\text{Equação 5})$$

$$\delta = 23,45 \sin \left[ \frac{360}{365} (284 + n) \right] \quad (\text{Equação 6})$$

$$h = (\text{Hora} - 12)15 \quad (\text{Equação 7})$$

Considerando os movimentos relativos do sol e a interceptação da radiação pelas folhas, folhas com formato semi-esférico podem ser consideradas ideais; entretanto, como as folhas de milho são planas, deve-se propor ângulos foliares que maximizem a interceptação da radiação durante os períodos do dia de maior atividade fotossintética, considerando a plasticidade morfológica do dossel (Sailaja *et al.*, 1997).

Com o surgimento de novos genótipos e técnicas de manejo para a cultura de milho, estudos têm sido realizados para a determinação do melhor espaçamento e densidade de semeadura (Pereira Filho *et al.*, 1998). Entretanto, Sangoi *et al.* (2002) e Sangoi (2001) e Molin (2000) consideram essenciais, e ao mesmo tempo escassas no Brasil, informações para quantificar o efeito do aumento da população de plantas sobre a cultura. Também foi considerado essencial identificar características morfológicas, fisiológicas, fenológicas e alométricas, notadamente se considerar as modificações introduzidas nos genótipos, como menor estatura das plantas e de inserção da espiga, angulação mais ereta de folhas e elevado potencial produtivo (Argenta, 2001). Apesar da carência de informações, alguns agricultores têm adotado com sucesso populações de plantas de até 7,2 plantas m<sup>-2</sup> e espaçamento entre linhas de 0,4 m (Fancelli & Dourado Neto, 2000).

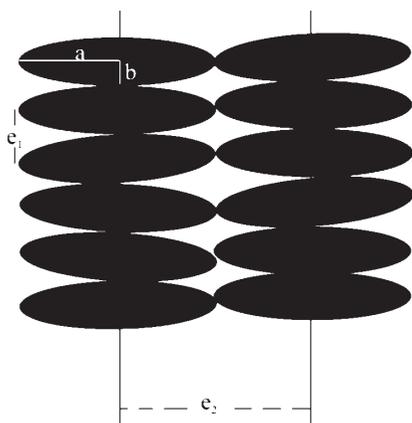
<sup>2</sup> Orientação da lâmina foliar normal à direção da radiação (Koller, 2000)

Considerando o exposto sobre a importância do IAF e do ângulo foliar sobre o rendimento da cultura do milho, bem como os efeitos da população e distribuição espacial de plantas de milho sobre os fatores considerados, além da dependência da população e distribuição espacial de plantas com relação às dimensões das folhas, o objetivo do presente trabalho foi propor equações para estimar a distância entre plantas na linha ( $e_1$ , m), a distância entre as linhas ( $e_2$ , m) e a área útil ( $A_u$ ,  $m^2\ pl^{-1}$ ) explorada por planta, em função do comprimento ( $C_f$ , m), da largura ( $L_f$ , m) e do ângulo foliar ( $\alpha$ , °) médios das folhas. Ainda com o propósito de subsidiar a escolha de cultivares em função da época de cultivo e da latitude, bem como programas de melhoramento, propor uma equação para estimar o ângulo foliar ( $\alpha$ , °) que propicie a melhor interceptação da radiação em função da data e do local, definido pela latitude ( $\phi$ , °).

**Materiais e Métodos**

Para definição da melhor distribuição de plantas de milho, foram feitas as seguintes assunções:

I. a projeção da copa da planta de milho tem forma elíptica (Figura 1), cuja área



**FIGURA 1.** Distribuição das projeções elípticas da copa do milho, ilustrando os semi-eixos *a* e *b*, o espaçamento entre plantas ( $e_1$ ) e o espaçamento entre fileiras ( $e_2$ ).

define a área útil ( $A_u$ ,  $m^2\ pl^{-1}$ ) explorada por planta;

II. a área da elipse é calculada por  $A = \pi \times a \times b$ , em que *a* e *b* são os semi-eixos da elipse, conforme apresentado na Figura 1;

III. a área bruta explorada por planta ( $A_p$ ,  $m^2\ pl^{-1}$ ) é calculada em função da população de plantas ( $P$ ,  $pl\ ha^{-1}$ ), independente da distribuição, conforme equação 4.

Considerando as assunções anteriores, se estabelecerão equações para determinação do espaçamento entre plantas na linha ( $e_1$ , m) e entre linhas de semeadura ( $e_2$ , m), bem como para o cálculo da área útil ( $A_u$ ,  $m^2\ pl^{-1}$ ) explorada por planta (Figura 1). Para tanto, foram considerados o formato elíptico da projeção da copa, o comprimento ( $C_f$ , m), a largura ( $L_f$ , m) e o ângulo médios das folhas ( $\alpha$ , °).

Aplicando-se as medidas contidas na Tabela 1 às equações deduzidas, calculou-se a distância entre plantas na linha ( $e_1$ , m), a distância entre linhas de semeadura ( $e_2$ , m), a população de plantas ( $pl\ ha^{-1}$ ) e a área útil ( $A_u$ ,  $m^2\ pl^{-1}$ ), comparando-se os resultados de cálculos de população com as recomendações de população de plantas para cada genótipo.

Considerando-se a população e a área útil calculadas e o número de folhas, calculou-se o Índice de Área Foliar (IAF) para cada genótipo.

Para a definição do melhor ângulo foliar em plantas de milho, foram feitas as seguintes assunções:

I. o ângulo da radiação solar sobre um plano horizontal, ângulo zenital ( $Z$ , °), é definido pela latitude ( $\phi$ , °), pela declinação ( $\delta$ , °) e pelo ângulo horário ( $h$ , °), conforme equação 5;

II. o ângulo de um plano perpendicular à orientação da radiação em relação ao plano horizontal local é definido pelo ângulo zenital (equação 5), portanto, o ângulo foliar perpendicular ao

vetor da radiação será dado pelo complemento ao ângulo reto do ângulo zenital calculado;

III. os maiores valores de radiação são obtidos ao meio dia solar, ou seja, quando o ângulo horário ( $h$ ) for igual a zero;

IV. o melhor ângulo foliar será aquele que definir a superfície adaxial da folha perpendicular ao vetor da radiação ao meio dia solar;

V. o ângulo foliar do milho apresenta plasticidade morfológica de até 20°.

Considerando as assunções sobre o ângulo foliar, foram estimados os ângulos foliares diários entre as 7 e as 12 horas, a intervalos de uma hora, para latitudes ( $\phi$ ), variando a cada 5°, compreendidas entre a linha do equador (0°) e 35°S, ou seja, a região do Brasil em que é cultivado milho. Para tanto, foram calculadas as declinações diárias ( $\delta$ , °) entre o dia 1° de janeiro e 31 de dezembro e os ângulos horários ( $h$ , °) entre as 7 e as 12 horas, aplicando-se as equações 6 e 7, respectivamente.

Os resultados das declinações ( $\delta$ , °) e dos ângulos horários ( $h$ , °) foram aplicados à equação 5, estimando-se os co-senos respectivos, os quais, calculando-se o arco do co-seno subtraído de 90, resultaram nos ângulos foliares ( $\alpha$ , °) horários (entre as 7 e as 12 horas) perpendiculares à orientação da radiação entre os dias 1° de janeiro e 31 de dezembro.

Considerando a plasticidade morfológica de 20° para o ângulo foliar em milho, foram selecionados, para cada latitude e dia do ano, os melhores ângulos foliares.

A seguir, considerando um ciclo de 120 dias, foi calculada, para cada latitude estudada, a maior variação de ângulo foliar requerida durante o ciclo, quando considerada a melhor curva horária de ângulo foliar, para semeaduras diárias entre os dias 1° de janeiro e 31 de dezembro.

## Resultados e Discussão

O espaçamento entre plantas na linha de semeadura ( $e_1$ , m) será igual à largura média das folhas ( $L_f$ , m) e o espaçamento entre fileiras ( $e_2$ , m), considerando o comprimento ( $C_f$ , m) e o ângulo de inserção ( $\alpha$ , °) médios das folhas, será calculado por:

$$e_2 = 2C_f \times \cos(90 - \alpha) \quad (\text{Equação 8})$$

A área útil ( $A_u$ , m<sup>2</sup> pl<sup>-1</sup>) explorada por planta será igual à área da elipse da projeção da copa, calculada por:

$$A_u = a \times b \times \pi \quad (\text{Equação 9})$$

Considerando que os semi-eixos  $a$  e  $b$  da elipse são iguais ao produto do comprimento médio da folha pelo co-seno médio do ângulo foliar e à metade da largura média da folha, respectivamente, tem-se:

$$A_u = \pi \times [C_f \times \cos(90 - \alpha)] \times \frac{L_f}{2} \quad (\text{Equação 10})$$

Considerando a equação 4, as dimensões médias de comprimento ( $C_f$ , m) e largura ( $L_f$ , m) da folha e o ângulo foliar médio ( $\alpha$ , °), a população de plantas ( $P$ , pl ha<sup>-1</sup>) é calculada por:

$$P = \frac{10000}{L_f \times [2C_f \times \cos(90 - \alpha)]} \quad (\text{Equação 11})$$

Considerando que a área útil ( $A_u$ , m<sup>2</sup>) representa a projeção média da copa e que o seu produto pela metade do número de folhas na planta ( $N_f$ ) representa a área foliar da planta, é possível calcular o Índice de Área Foliar (IAF, m<sup>2</sup> área foliar m<sup>-2</sup> de solo) da cultura pela equação 12.

$$IAF = \frac{Au \times \frac{Nf}{2}}{\frac{10000}{P}} \quad \text{(Equação 12)}$$

Aplicando-se os dados e ângulo foliar ( $\alpha$ , °), comprimento da folha (Cf, m), largura da folha (Lf, m) e número de folhas por planta (Tabela 1) às equações 8, 10 e 11, calculou-se o

espaçamento entre linhas de semeadura ( $e_2$ , m), a área útil (Au, m<sup>2</sup>) e a população de plantas (P, 1000 pl ha<sup>-1</sup>), respectivamente (Tabela 2).

Observa-se (Tabela 2) que, com exceção dos genótipos 7, 10, 12, 15 e 16, os IAFs estimados estão entre 5 e 7 e, portanto, adequados aos recomendados para a cultura do milho, o que corrobora a estimativa da melhor população de

**TABELA 1.** Medidas do comprimento médio da folha (Cf, m), da largura média da folha (Lf, m), do ângulo foliar médio ( $\alpha$ , °), número de folhas na planta e população de plantas (P, 1000 pl ha<sup>-1</sup>) recomendadas de 20 genótipos de milho. (Dados fornecidos por Dr. Ramiro Vilela, Dr. Paulo César Magalhães, pesquisadores da Embrapa Milho e Sorgo).

Genótipo	Ângulo foliar médio (á, °)	Comprimento médio da folha (Cf, m)	Largura média da folha (Lf, m)	Número de folhas na planta	População recomendada (1000 pl ha <sup>-1</sup> )
1	17	1,05	0,21	16	65 a 70
2	27	1,02	0,23	15	50 a 55
3	24	1,08	0,24	14	50 a 55
4	21	1,03	0,23	15	55 a 60
5	24	0,94	0,24	14	50 a 55
6	29	0,98	0,24	15	50 a 55
7	26	0,76	0,23	12	65 a 70
8	35	0,69	0,21	13	65 a 70
9	32	0,71	0,21	14	65 a 70
10	21	0,83	0,23	12	70 a 75
11	30	0,65	0,22	14	65 a 70
12	18	0,74	0,23	12	75 a 80
13	24	0,77	0,23	13	65 a 70
14	16	0,91	0,23	13	75 a 80
15	29	0,81	0,24	12	55 a 60
16	26	0,64	0,24	12	70 a 75
17	31	0,77	0,22	15	65 a 70
18	37	0,67	0,25	13	50 a 55
19	32	0,65	0,27	14	55 a 60
20	17	0,83	0,23	13	75 a 80

plantas considerando-se as dimensões de comprimento e largura da folha.

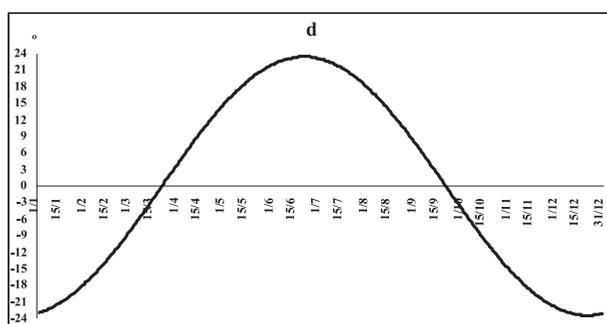
As populações recomendadas são resultado de avaliações de diferentes populações dos genótipos em diferentes ambientes, determinando a população que maximiza o rendimento de

grãos. Observa-se que, com exceção dos genótipos 6, 12, 17 e 20, a equação para o cálculo com relação ao ângulo foliar horário ( $a$ , °), em função da latitude do local ( $f$ , °) e do dia, utilizando-se a equação 6, foram calculadas as declinações solares ( $d$ , °) para os dias entre 1° de

**TABELA 2.** Medidas calculadas do espaçamento entre plantas na linha de semeadura ( $e_1$ , m), entre linhas de semeadura ( $e_2$ , m), da população de plantas ( $P$ , 1000 pl ha<sup>-1</sup>), da área útil explorada por planta ( $Au$ , m<sup>2</sup>) e do Índice de Área Foliar (IAF, m<sup>2</sup> folha m<sup>-2</sup> de solo) de 20 genótipos de milho.

Genótipo	Espaçamento entre plantas ( $e_1$ , m)	Espaçamento entre linhas ( $e_2$ , m)	População calculada ( $P$ , 1000 pl ha <sup>-1</sup> )	Diferença de população (DP, %)	Área útil ( $Au$ , m <sup>2</sup> )	IAF (m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> )
1	21	62	77	10	1016,5	6,3
2	23	91	48	-5	1647,5	5,9
3	24	86	48	-4	1629,5	5,5
4	23	74	59	-2	1331,0	5,9
5	24	77	54	-1	1447,5	5,5
6	24	93	45	-11	1761,1	5,9
7	23	67	65	1	1202,1	4,7
8	21	78	61	-6	1287,3	5,1
9	21	74	65	-1	1216,8	5,5
10	23	59	74	-2	1065,1	4,7
11	22	64	71	1	1112,9	5,5
12	23	46	95	19	823,9	4,7
13	23	61	71	1	1110,7	5,1
14	23	49	88	10	891,6	5,1
15	24	77	54	-2	1455,3	4,7
16	24	56	74	-1	1056,0	4,7
17	22	79	58	-11	1365,1	5,9
18	25	81	50	-1	1583,4	5,1
19	27	68	54	-1	1444,8	5,5
20	23	49	90	13	870,1	5,1

janeiro e 31 de dezembro (Figura 2), enquanto os ângulos horários ( $h$ , °), calculados pela equação 7, para as 7, 8, 9, 10, 11 e 12 horas, resultaram em -75, -60, -45, -30, -15 e 0°, respectivamente.



**FIGURA 2.** Declinações solares ( $d$ , °) de 1º de janeiro a 31 de dezembro.

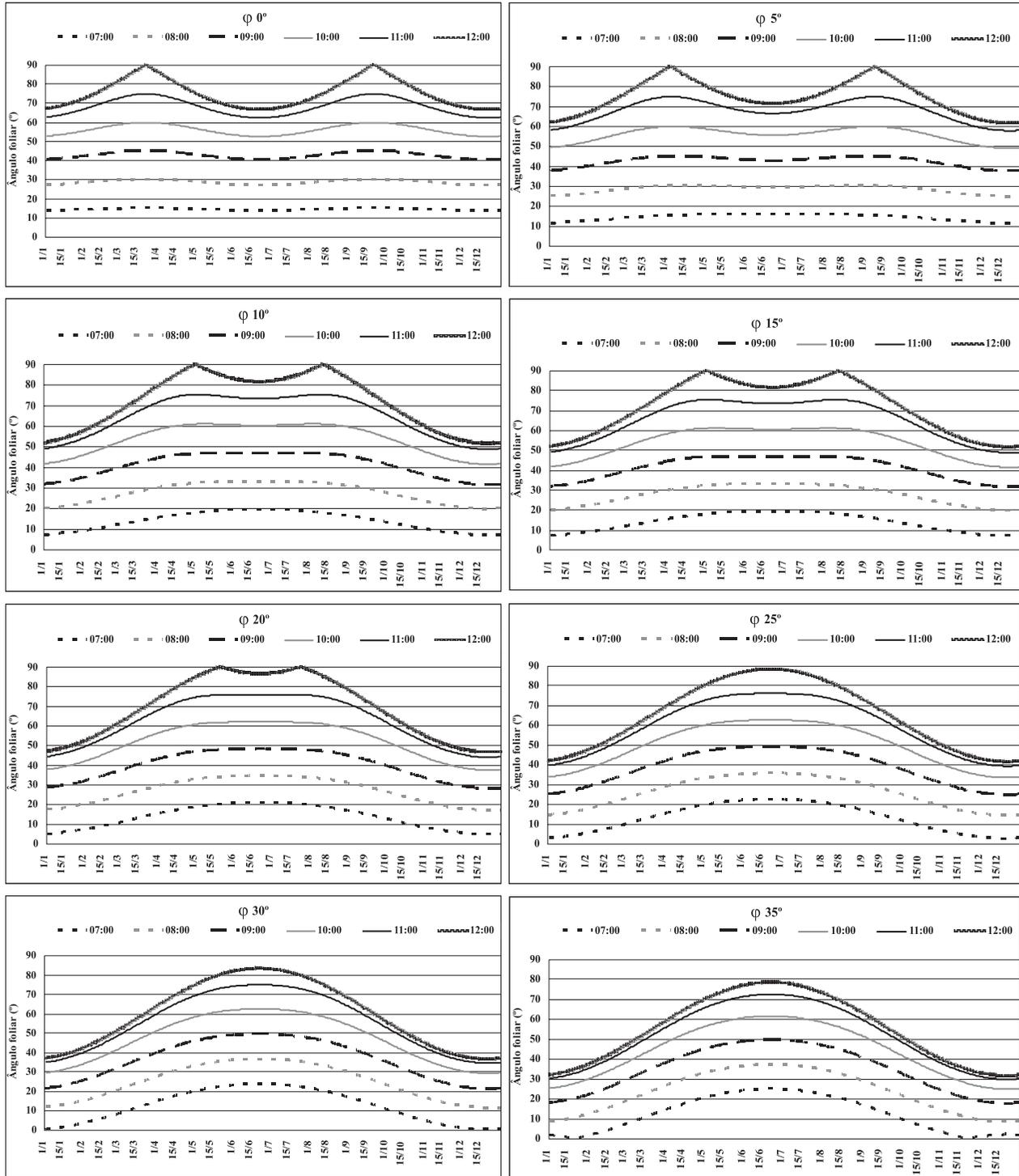
Aplicando-se a equação 5 às latitudes ( $\phi$ , °) propostas, os valores calculados para a declinação ( $\delta$ , °) e para os ângulos horários ( $h$ , °), foram calculados os co-senos dos ângulos zenitais ( $Z$ , °). Os arcos dos ângulos zenitais ( $Z$ , °), subtraídos de 90°, resultaram nos ângulos foliares ( $\alpha$ , °), em que a superfície adaxial da folha é normal ao vetor da radiação, às 7, 8, 9, 10, 11 e 12 horas, para as latitudes compreendidas entre o equador (0°) e 35°S a cada 5° (Figura 3).

Observa-se, nas Figuras que latitudes menores requerem maior ângulo foliar, quando comparadas às maiores. Calculando-se as diferenças diárias entre os ângulos foliares (Figura 4), observa-se que latitudes menores requerem maior plasticidade do ângulo foliar, pois, a exemplo dos casos da linha do equador e 35°S, para que a superfície adaxial da folha permaneça perpendicular à radiação durante todo o dia, ela deverá variar o ângulo foliar em 75° e 53°, respectivamente. Essa característica possibilita que, em latitudes maiores, a folha permaneça maior perío-

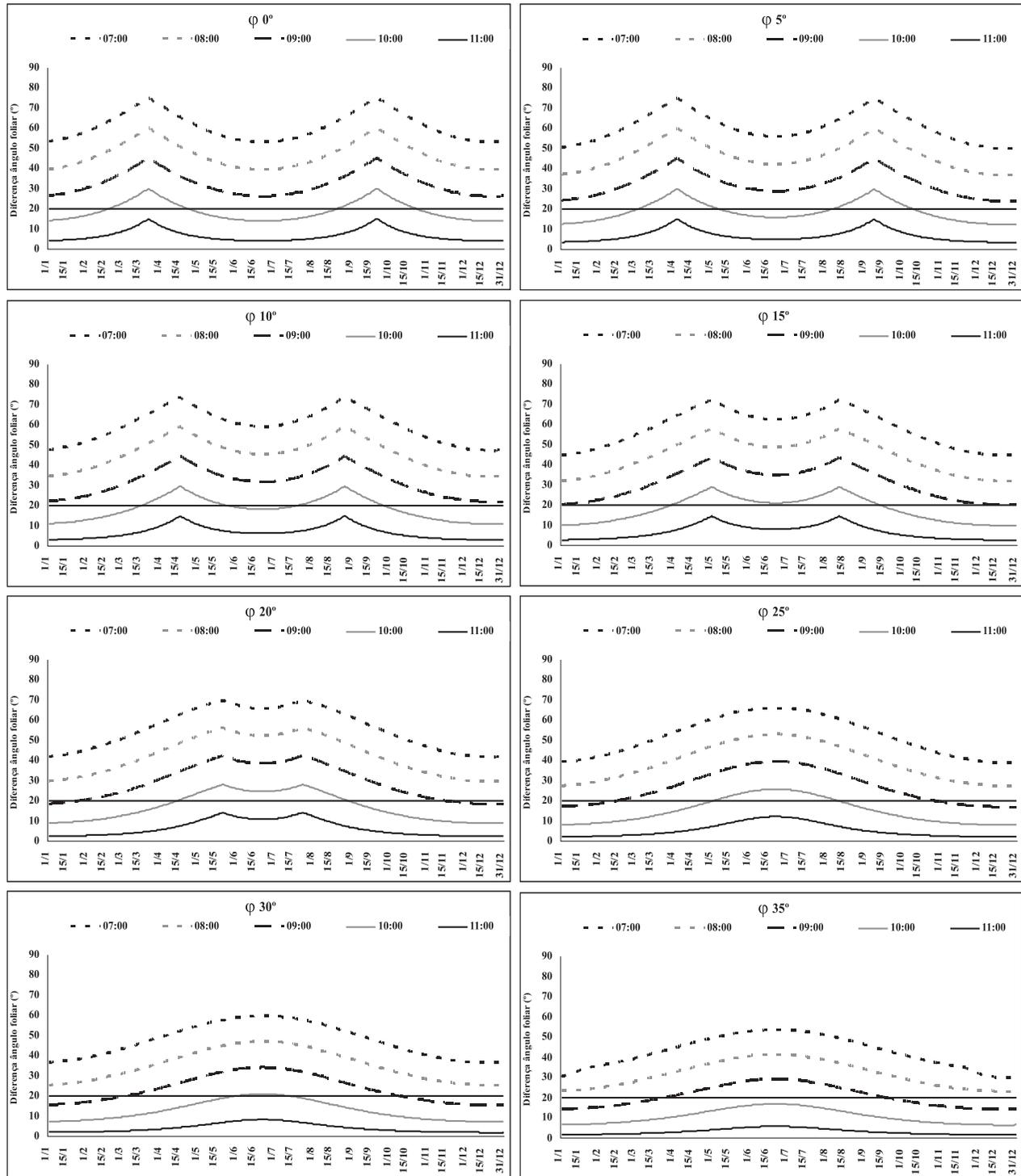
do do dia com sua superfície adaxial perpendicular à radiação solar. Tomando-se novamente os exemplos da linha do equador e 35°S e considerando a plasticidade morfológica do ângulo foliar de 20°, observa-se que, para a linha do equador, as superfícies adaxiais das folhas permanecem menos que duas horas e trinta minutos perpendiculares à radiação, destacando que, nos períodos de 20/2 a 20/4 e 18/8 a 20/10, serão menos que duas horas diárias (Figura 5). Já no caso de 35°S, com exceção do período entre os dias 10/5 e 2/8, as folhas permanecem com suas superfícies adaxiais mais que duas horas e trinta minutos perpendiculares à radiação, chegando a três horas e quarenta minutos (Figura 5). Entretanto, quando considerada a produção fotossintética, é possível que o maior período não compense a diferença na intensidade de radiação entre as localidades.

Na Figura 6, são apresentados os melhores ângulos foliares em função da latitude ( $\phi$ , °) e do dia. Considerando que a maior demanda por fotoassimilados em milho ocorre durante o período reprodutivo, o qual coincide com a área foliar máxima, e que, nos estádios iniciais da cultura, não há limitação de radiação por auto-sombreamento, é possível, na Figura 20, identificar o melhor ângulo foliar para as diferentes latitudes ( $\phi$ , °). Citam-se como exemplos semeaduras na linha do equador e 35°S em 20/11 e período vegetativo de 60 dias para ambos os locais. Consultando-se a Figura 6, verifica-se que os melhores ângulos foliares são 58 e 23°, respectivamente, ou seja, os ângulos foliares correspondentes à data do início do período reprodutivo (20/2).

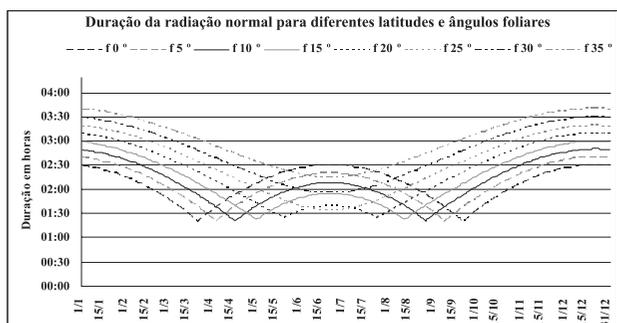
Considerando os melhores ângulos foliares horários para cada latitude e ciclo de 120 dias, observa-se (Figura 7) que as menores latitudes requerem menor variação do ângulo foliar



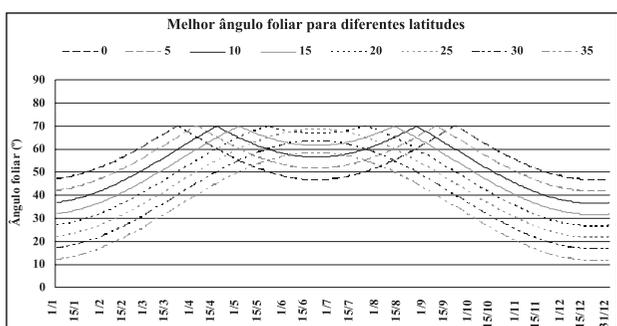
**FIGURA 3.** Ângulos foliares ( $\alpha$ , °), na linha do equador ( $\phi 0^\circ$ ),  $5^\circ\text{S}$  ( $\phi 5$ ),  $10^\circ\text{S}$  ( $\phi 10$ ),  $15^\circ\text{S}$  ( $\phi 15$ ),  $20^\circ\text{S}$  ( $\phi 20$ ),  $25^\circ\text{S}$  ( $\phi 25$ ),  $30^\circ\text{S}$  ( $\phi 30$ ) e  $35^\circ\text{S}$  ( $\phi 35$ ), cujas superfícies adaxiais das folhas são normais ao vetor da radiação solar às 7, 8, 9, 10, 11 e 12 horas, para diferentes períodos do ano.



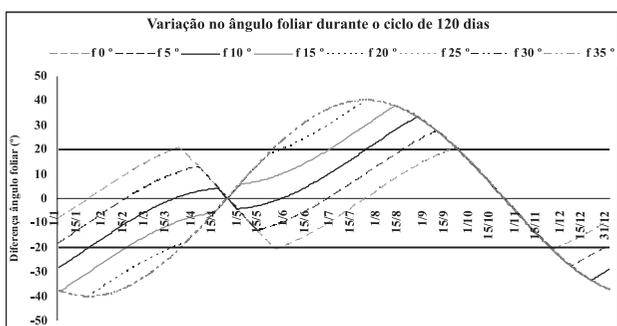
**FIGURA 4.** Diferenças entre os ângulos foliares ( $\alpha$ , °), na linha do equador ( $\phi$  0°), 5°S ( $\phi$ 5), 10°S ( $\phi$ 10), 15°S ( $\phi$ 15), 20°S ( $\phi$ 20), 25°S ( $\phi$ 25), 30°S ( $\phi$ 30) e 35°S ( $\phi$ 35) calculados para 7, 8, 9, 10 e 11 horas, e os ângulos foliares ( $\alpha$ , °), calculados para as 12 horas.



**FIGURA 5.** Duração (horas) da superfície adaxial das folhas perpendiculares à radiação para as latitudes ( $\phi$ ) 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30 e 35°S.



**FIGURA 6.** Melhores ângulos foliares em função da latitude ( $\phi$ ) e do dia do ano.



**FIGURA 7.** Diferenças de ângulos foliares ( $\alpha$ , °) requeridas durante o ciclo, para semeaduras diárias nas latitudes ( $\phi$ ) 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30 e 35°S.

durante o ciclo da planta. No caso da linha do equador, a maior variação durante o ciclo foi de 20°, ou seja, é possível a planta adequar o ângulo foliar durante todo o ciclo. Já no caso de latitudes maiores que 20°S, apenas para semeaduras nos períodos de 17 de março a 31 de maio e 22 de setembro a 22 de novembro, a variação no ângulo foliar durante o ciclo é menor que o limite da plasticidade.

Considerando o exposto e as limitações por baixas temperaturas em latitudes maiores que 25°S, é possível inferir que, nessas latitudes, são recomendadas semeaduras entre os dias 22 de setembro e 22 de novembro e cultivares com ângulos foliares próximos a 40°. Já em latitudes menores que 20°S, são recomendadas semeaduras de 15 de fevereiro a 1° de julho e 20 de setembro a 23 de novembro, sendo os períodos ampliados progressivamente até o equador, com semeadura durante todo o ano, utilizando cultivares com ângulos foliares de, aproximadamente, 60 e 50°, respectivamente aos períodos.

### Conclusões

A indicação da população de plantas para a cultura do milho deve considerar as dimensões médias do comprimento e da largura das folhas, as quais determinam a distribuição espacial das plantas.

A latitude do local e o período do ano em que ocorre o estágio reprodutivo da planta devem ser considerados para otimização da interceptação da radiação solar, sendo o ângulo foliar inverso à latitude do local entre o solstício de verão e o de inverno.

As equações e metodologias descritas devem ser validadas pela comparação dos resultados de rendimento, obtidos de genótipos com diferentes arquiteturas de copa, cultivados em diferentes latitudes e períodos do ano.

### Agradecimentos

Agradecemos a Paulo César Magalhães, Ramiro Vilela, pesquisadores da Embrapa Milho e Sorgo os dados referentes à arquitetura do dossel, os quais contribuíram para a realização deste trabalho.

### Literatura Citada

- ANDRADE, F. H.; UART, S.; ARGUISSAIN, G. **Rendimiento potencial de maiz en Balcarce**: analisis de los factores que lo determinan. Balcarce: Instituto Nacional de Tecnologia Agropecuária, 1991. 11 p. (INTA.Boletim Técnico, 101).
- ARGENTA, G. S. Resposta de híbridos simples à redução do espaçamento entre linhas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 16, n. 1, p. 71-78, 2001.
- AUSTIN, R. B. FORD, M. A. MORGAN, C. L. Genetic improvement in the yield of winter wheat: a further evaluation. **Journal of Agricultural Sciences**, Cambridge, v. 112, p. 295-301, 1989.
- BOEDHRAM, N.; ARKEBAUER, T. J.; BATCHELOR, W. D. Season-long characterization of vertical of leaf area in corn. **Agronomy Journal**, Madison, v. 93, p. 1235-1242, 2001.
- DOURADO NETO, D., FANCELLI, A. L.; LOPES, P. P. Milho: população e distribuição de plantas. In: FANCELLI, A. L.; DOURADO NETO, D. (Ed.). **Milho**: tecnologia da produtividade. Piracicaba: ESALQ, 2001. p. 120-125.
- DUVICK D. N. Genetic contributions to advances in yield of U.S. maize. **Maydica**, Bergamo, v. 37, p. 69-79, 1992.
- GIFFORD, R. M.; EVANS, L. T. Photosynthesis, carbon partitioning and yield. **Annual Review of Plant Physiology**, Palo Alto, v. 32, p. 485-509, 1981.
- FANCELLI, A. L.; DOURADO NETO, D. **Produção de milho**. Guaíba: Agropecuária, 2000. 360 p.
- HORTON, P. Prospects for crops improvement through the genetic manipulation of photosynthesis: morphological and biochemical aspects of light capture. **Journal of Experimental Botany**, London, v. 51, p. 475-485, 2000.
- KELLOMAKI, S.; OKER-BLOM, P.; KUULUVAINENT, T. Effect of crow and canopy structure on light interception and distribution in a tree stand. In: TIGERSTEDT, P. M. A.; PUTTONEN, P.; KOSKI, V. (Ed.). **Crop physiology of forest trees**. Helsinki: University of Helsinki, 1985. p. 107-115.
- KINIRY, J. R.; GERIK, T. J.; XIE, Y. Similarity of maize seed number responses for a diverse set of sites. **Agronomie**, Paris, v. 22, n. 3, p. 265-272, 2002.
- LARCHER, W. **Physiological plant ecology**. Berlin: Springer-Verlag, 1995. 506 p.
- MACHADO, E. C. Eficiência fotossintética. In: SEMINÁRIO DE BIOTECNOLOGIA AGRÍCOLA, 1985, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: FEALQ, 1985. p.175-200.
- MADDONI, G. A.; CHELE, M.; DROUET, J. L.; ANDRIEU, B. Light interception of contrasting azimuth canopies under square and rectangular plant spatial distributions: simulations and crop measures. **Fields Crops Research**, Amsterdam, v. 70, p. 1-13, 2000.

- MADDONI, G. A.; OTEGUI, M. E.; CIRILO, A. G. Plant population density, row spacing and hybrid effects on maize canopy architecture and light attenuation. **Fields Crops Research**, Amsterdam, v. 71, p. 183-193, 2001.
- MOLIN, R. **Espaçamento entre linhas de semeadura na cultura de milho**. Castro: Fundação ABC, 2000. 72 p.
- OHIO STATE UNIVERSITY. **Corn production**. (Bulletin, 472). Disponível em: <<http://www.ohioline.osy.edu/b472/front.html>> Acesso em: 8 jan. 2003.
- PEREIRA FILHO, I. A. P.; OLIVEIRA, A. C.; CRUZ, J. C. Milho verde: espaçamentos, densidades de plantas, cultivares e épocas de semeadura, influenciando o rendimento e algumas características de espigas comerciais (compact disc). In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO 22., Recife, 1998. **Globalização e segurança alimentar** - resumos. Recife: ABMS, 1998. p. 255.
- POMMEL, B.; MOURAUX, D.; CAPPELLEN, O.; LEDENT, J. F. Influence of delayed emergence and canopy skips on the growth and development of maize plants: a plant scale approach with CERES-Maize. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 16, n. 4, p. 263-277, 2002.
- PUKKALA, T.; KUULUVAINEN, T. Effect of crown shape and tree distribution on the spatial- distribution of shade. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 40, p. 215-231, 1987.
- SAN PIETRO, A.; GREER, F. A.; ARMY, T. J. (Ed.). **Harvesting the sun**. New York: Academic Press, 1969. 342 p.
- SACHULZE, E. D.; CALDWELL, M. M. **Ecophysiology of photosynthesis**. Berlin: Springer-Verlag, 1995. 576 p.
- SAILAJA, M. V.; CHANDRASEKHAR, D.; NARAYANA, D.; RAMA, V. S. Laser-induced chlorophyll fluorescence ratio in certain plants exhibiting leaf heliotropism. **Australian Journal of Plant Physiology**, Victoria, v. 24, p. 159-164, 1997.
- SANGOI, L.; GRACIETTI, M. A.; BIANCHET, P. Híbridos contemporâneos são mais exigentes em população de plantas para maximizarem o rendimento de grãos. (compact disc). In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 24., 2002, Florianópolis. **Meio ambiente e a nova agenda para o agronegócio de milho e sorgo**: resumos. Sete Lagoas: ABMS: Embrapa Milho e Sorgo: Epagri, 2002.
- SANGOI, L. Understanding plant density effects on maize growth and development: an important issue to maximize grain yield. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 31, p. 159-168, 2001.
- STEWART, D. W.; DWYER, L. M. Mathematical characterization of leaf shape and area of maize hybrids. **Crop Science**, Madison, v. 39, p. 422-427, 1999.
- TERASHIMA, I. Productive structure of a leaf. In: BRIGGS, W. R. (Ed.). **Photosynthesis**. New York: Alan R. Liss, 1989. p. 207-226.
- VIANELLO, R. L. **Meteorologia básica e aplicações**. Viçosa: UFV. 2000. 448 p.
- VIEIRA JR, P. A. Milho. In: CASTRO, P. R. C.; KLUGE, R. A. (Ed.). **Ecofisiologia dos cultivos anuais**. São Paulo: Nobel, 1999. p. 41-72.