

Coeficiente de Extinção de Luz para o Híbrido Dkb 390 em dois Níveis de Suprimento de Nitrogênio

Light extinction coefficient for hybrid Dkb 390 under two levels of nitrogen supply

Euro Roberto Detomini¹, Luiz Fernando Druzina Massignan²; Marcos Silveira

Bernardes³; Durval Dourado Neto⁴

Resumo: O coeficiente de extinção de luz expressa a relação existente entre a radiação solar interceptada e o índice de área foliar, e varia de acordo com a espécie e com o desenvolvimento do ciclo, para cada espécie. Por essa relação ser essencial para a fotossíntese e, consequentemente, para a produção de biomassa, o valor do coeficiente de extinção deve ser considerado em qualquer modelo de simulação de produção vegetal, mesmo sendo assumido constante, o que pode ser válido em algumas situações particulares. Este trabalho teve como objetivo determinar valores de coeficiente de extinção para modelos de simulação que contemplam a cultura do milho, especificamente o híbrido DKB 390, conduzido sob suprimento hídrico não limitante e com elevadas populações de planta. Para condições de suprimentos subótimo e satisfatório de nitrogênio, valores da ordem de 0,45 e 0,43 foram encontrados para o mencionado genótipo, respectivamente, podendo o último ser adotado para efeitos de simulação de rendimento.

Palavras-Chave: Interceptação de luz, índice de área foliar, radiação solar, milho

Abstract: The light extinction coefficient provides a relationship between intercepted solar radiation and leaf area index, varying according to species and crop stage. As this relation is essential for the photosynthesis processes and consequently for the biomass production, the extinction coefficient value should be considered in any crop model, even if constant, in case of suitable to the situation. This work aims to provide useful values, as well as discuss them, for models contemplating maize crops, specifically for the hybrid DKB 390 cultivated under high plant population and near-optimal conditions of water supply. For sub-optimal and satisfactory conditions of nitrogen supply, the magnitude of 0.45 and 0.43 were found for the mentioned genotype, respectively, whereas the latter can be adopted for yield simulation models.

Keywords: light interception, leaf area index, solar radiation, maize

¹ Doutorando em Irrigação e Drenagem, ESALQ/USP. Bolsista do CNPq. detomini@esalq.usp.br

² Acadêmico de graduação em Engenharia Agronômica, ESALQ/USP. lfdmassi@esalq.usp.br

³ Professor Doutor, Departamento de Produção Vegetal, ESALQ/USP. dourado@esalq.usp.br

⁴ Professor Titular, Departamento de Produção Vegetal, ESALQ/USP. msbernard@esalq.usp.br

Introdução

O coeficiente de extinção de luz (k) é um atributo relacionado à morfologia da vegetação, principalmente à distribuição vertical entre folhas, a qual reside na organização espacial das mesmas, definindo a proporção de luz que será transmitida em função das propriedades óticas e da geometria e disposição das folhas em relação à luz incidente (BERNARDES, 1987).

Matematicamente, k relaciona o ângulo foliar à habilidade de cada unidade de índice de área foliar interceptar luz solar (LOOMIS e CONNOR, 1992; p.274). Seu valor varia principalmente em função da arquitetura do dossel, tipicamente entre as magnitudes de 0,7 a 1, para culturas com folhas planófilas (leguminosas em geral, por exemplo), ou de 0,3 a 0,5, para aquelas com erectófilas (boa parte dos híbridos de milho), em termos de valores médios (ROSENBERG et al., 1983). Por esse motivo, para que um máximo grau de interceptação de luz seja atingido, dosséis planófilos geralmente o fazem diante de um menor valor de índice de área foliar que os dosséis erectófilos.

De acordo com a Lei de Bouger-Lambert, o fluxo de radiação fotossinteticamente ativa transmitida (RFA_t , MJ m⁻² dia⁻¹) verticalmente ao longo do dossel pode ser derivado da Lei de Beer (MONSI e SAEKI, 1953):

$$RFA_t = RFA_0 \cdot (e^{-k \cdot IAF}) \quad (1)$$

em que RFA_0 se refere ao fluxo de radiação fotossinteticamente ativa incidente (MJ m⁻² dia⁻¹) no topo do dossel; k ao coeficiente de extinção [m² (solo) m⁻² (folha)]; e IAF ao índice de área foliar [m² (folha) m⁻² (solo)].

A diferença básica entre as leis de Bouger-Lambert e de Beer é que a segunda assume um meio homogêneo, tal como não ocorre com as folhas de uma população de plantas (LOOMIS e CONNOR, 1992; p.36), fazendo com que o valor de k não seja constante nem ao longo do perfil das folhas, nem ao longo do ciclo da cultura. Contudo, tanto para culturas plenamente irrigadas quanto não, MEINKE (1996) confirma que k é variável, diminui com o desenvolvimento da cultura, tendendo a não mais variar a partir de um certo valor de IAF , mas também demonstra que um valor constante pode ser assumido sem grandes problemas, para efeitos de simulação de biomassa, desde que um elevado valor de máximo índice de área foliar seja atingido pela cultura. Caso o máximo valor de IAF seja baixo, como pode ocorrer facilmente em culturas desenvolvendo-se sob baixo suprimento hídrico, a assunção de k constante pode implicar em erros substanciais em simulações.

Uma vez que o índice de área foliar e que a fração de radiação transmitida podem ser medidos experimentalmente, a eq. (1) pode ser invertida de forma a explicitar k para a obtenção experimental de seus valores, de acordo com:

$$k = -\frac{1}{IAF} \cdot \ln\left(\frac{RFA_t}{RFA_0}\right) \quad (2)$$

em que o quociente RFA_t / RFA_0 pode ser interpretado como transmitância, ou fração de radiação fotossinteticamente ativa transmitida (t) às “camadas de folha” inferiores (em relação ao topo da vegetação), fazendo que a radiação interceptada (fI) seja, por definição:

$$fI = 1 - t \quad (3)$$

Na equação acima, fI pode ser também entendido, a grosso modo, como a denotação da porcentagem de cobertura do dossel em relação ao solo, considerando que as folhas são aleatoriamente orientadas e dispersas (LOOMIS e CONNOR, 1992; p.274); ou mais precisamente, como a soma das frações absorvidas e refletidas (RUSSEL et al., 1989).

Visando mostrar, ainda, que o coeficiente de extinção é um dos fatores que mais contribuem para os padrões de alocação de nitrogênio no dossel, o qual depende também do IAF de do conteúdo de nitrogênio nas folhas (NF), YIN et al. (2003) fornecem subsídios que evidenciam a existência de relações consistentes entre IAF e NF , dependendo do grau de cobertura do relvado, principalmente nos estádios de desenvolvimento em que essa cobertura é ainda pequena ou então já bem fechada já que, nos estádios intermediários, os padrões de alocação dependerão também do regime de adubação nitrogenada.

Dependente do valor de k , a interceptação de luz pelo dossel das culturas é essencial para a fotossíntese e, consequentemente, para a produção de biomassa. Assim, esse atributo deve ser considerado em qualquer modelo de simulação, tal como fizeram MONTEITH (1965), JONES e KINIRY (1986) e MEINKE et al. (1997), ou quando da utilização do programa computacional APSIM 5.2 (ROBERTSON et al., 2007), que assume um valor fixo de $k = 0,45$ para a cultura do milho.

Este trabalho tem por objetivo determinar valores de coeficiente de extinção para modelos de simulação para a cultura de milho, genótipo DKB 390, conduzido sob suprimento hídrico não limitante e com elevadas populações de planta. Objetivos secundários incluem a análise da variação do coeficiente de extinção ao longo do ciclo da cultura e para situações de suprimento ótimo e subótimo de nitrogênio.

Material e Métodos

O experimento foi instalado no pivô central experimental do Departamento de Produção Vegetal da ESALQ/USP, situado no município de Piracicaba – SP (22° 41' 30" S, 47° 38' 30" W, 546 m de altitude), e conduzido no período de novembro de 2005 e abril de 2006. O clima do local é do tipo Cfa, conforme o sistema de KÖPPEN modificado (ROLIM et al., 2007). O solo é

classificado como Nitossolo Eutroférico típico, de alta fertilidade, isento de Al^{3+} , de topografia suave (1,5%), com cerca de 65% de teor de argila. O material genético de *Zea mays* L. empregado foi o híbrido semiprecoce DKB 390, com espaçamento de 90 cm, visando uma população final de 66.666 plantas ha^{-1} .

Após preparo de solo convencional, a semeadura foi realizada em 24/11/2005, a 2 cm de profundidade, com uma adubação de 400 kg ha^{-1} de 08-28-16. A emergência ocorreu em 29/11/2005 e o desbaste (necessário ao ajuste da população) foi realizado 19 dias após a emergência (DAE). Visando ao controle da lagarta-do-cartucho, quatro aplicações foram necessárias, sendo: 0,6 L ha^{-1} de VEXTER (11 e 15 DAE); 150 mL ha^{-1} de NOMOLT para lagartas de primeiro instar (23 DAE); e 150 mL ha^{-1} TRACER (38 DAE), visando proteger a cultura contra danos na fase de enchimento de grãos. Os danos foliares provocados pelas lagartas foram irrigatórios, minimizando o erro experimental. Visando ao controle de plantas daninhas, duas capinas associadas a controle manual, na linha de semeadura, foram necessárias, tendo sido realizadas aos 16 e 39 dias após a emergência. A irrigação foi acionada sempre em dias não chuvosos, com lâmina máxima de 12 mm dia $^{-1}$, com base nos dados experimentais (de planta e atmosfera) relatados pelo balanço hídrico de DETOMINI et al. (2009), não tendo sido constatado déficit hídrico ao analisá-los no programa computacional APSIM 5.2, o qual é apresentado em KEATING et al. (2003).

Os dados de interceptação luminosa e de área foliar foram extraídos de um experimento cujos tratamentos eram referentes à aplicação ou não de nitrogênio na segunda cobertura, associado ou não à aplicação de fungicidas para o controle de fungos quando a população estivesse em pendoamento predominante (56 DAE). O delineamento experimental foi em blocos casualizados, com oito tratamentos e quatro repetições, totalizando 32 parcelas de 7 x 4,5 m, com cinco linhas de semeadura cada. As adubações de cobertura foram realizadas 18 e 37 dias após a emergência (V4 e V8, respectivamente), contemplando 50 kg (N) ha^{-1} e 25 kg (K) ha^{-1} utilizando-se 30-00-20 misturado com cloreto de potássio, na primeira cobertura, e 50 kg (N) ha^{-1} , com sulfato de amônio, na segunda, para os tratamentos destinados.

Em cada adubação (tanto na semeadura quanto em cobertura), considerou-se uma eficiência de adubação nitrogenada equivalente a 60%, para resultar nos 30 kg (N) ha^{-1} desejados. Não tendo havido interações entre nitrogênio e fungicidas que resultassem em diferenças significativas na produção final e nem no índice de área foliar, a análise do coeficiente de extinção foi separada em: i) tratamentos que receberam, ao todo, 60 kg (N) ha^{-1} (denominados, a partir de então, N60); ii) tratamentos que receberam, ao todo, 90 kg (N) ha^{-1} (denominados, então, N90).

Conforme sugerido por SINCLAIR e MUCHOW (1999), a fração de radiação fotossinteticamente ativa (RFA) transmitida foi obtida em função das medidas de RFA, com o ceptômetro quântico (Delta T devices), posicionando os sensores no topo do dossel e rente à superfície do solo, tomando-se seis subamostra por parcela. Cada subamostra foi coletada atravessando-se o ceptômetro na entrelinha, de forma diagonal, tentando-se obter um ângulo de 45° entre o ceptômetro e a linha de semeadura. As coletas foram realizadas semanalmente, entre 11h e 13h, visando minimizar o ângulo zenital. A área foliar total por planta (AFT , cm^2) foi medida através do equipamento LAI 3000 (LICOR). As medidas consideraram o limbo foliar, desprovido das bainhas.

As relações de dependência do desenvolvimento relativo da cultura (Dr) com o índice de área foliar foram ajustadas de acordo com um aplicativo computacional. Considera-se $Dr = 1$ quando a cultura atinge o ponto de maturidade fisiológica (pmf , verificado em 110 DAE, no caso específico do experimento). O desenvolvimento relativo da cultura foi assim calculado:

$$Dr_j = \frac{GDA_j}{GDA_{pmf}} \quad (4)$$

em que GDA_j e GDA_{pmf} se referem às somas térmicas acumuladas ($^{\circ}\text{C dia}$), após a emergência, até o j -ésimo dia do ciclo e até o ponto de maturidade fisiológica ($j = pmf$), respectivamente; sendo:

$$GDA_j = \sum_{j=1}^n GD_j \quad (5)$$

em que GD_j se refere ao tempo térmico ($^{\circ}\text{C dia}$) ocorrente no j -ésimo dia do ciclo.

Ao revisar os conceitos de graus-dia, BONHOMME (2000) aponta as limitações do método tradicional e sugere a função beta, proposta por YIN et al. (1995), como sendo ideal para se calcular o tempo térmico, caso se opte por modelos não-lineares; pois tal função é baseada em leis matemáticas relativamente flexíveis e apresenta poucos parâmetros, sendo, ainda, todos com significado físico-biológico. Se a taxa de desenvolvimento relativo de uma cultura apresenta uma forma funcional não-linear (PEREIRA et al., 2002; p.332), mas, em contrapartida, apresenta uma relação linear com o tempo térmico, este pode ser descrito pela função beta simplificada:

$$GD_j = GD_{\max} \cdot \left(\frac{TD_{\max} - T_j}{TD_{\max} - TD_{op}} \right) \cdot \left(\frac{T_j - TD_{\min}}{T_{op} - TD_{\min}} \right)^{\frac{T_{op} - TD_{\min}}{TD_{\max} - T_{op}}} \quad (6)$$

em que T_j se refere à temperatura média diária do ar ($^{\circ}\text{C}$) no j -ésimo dia do ciclo da cultura (após a emergência); TD_{\min} se refere à temperatura ($^{\circ}\text{C}$) abaixo da qual não há desenvolvimento; TD_{\max} à temperatura ($^{\circ}\text{C}$) acima da qual não há desenvolvimento; T_{op} à temperatura ($^{\circ}\text{C}$) ótima de desenvolvimento; GD_{\max} soma térmica ($^{\circ}\text{C dia}$) existente em um dia (correspondente à temperatura

ótima). De acordo com os dados de fitomassa seca (não revelados neste trabalho) e de temperatura média do ar, medida na Estação Meteorológica Automática da ESALQ/USP, os seguintes parâmetros foram ajustados: $GD_{\max} = 25^{\circ}\text{C dia}$, e que $TD_{\max} = 44^{\circ}\text{C}$; $T_{op} = 35^{\circ}\text{C}$; e $TD_{\min} = 0$.

Por conseguinte, diante do ajuste de AFT em função de Dr , o índice de área foliar no j -ésimo dia do ciclo (IAF_j) foi calculado pela seguinte expressão:

$$IAF_j = 10^{-4} \cdot AFT_j \cdot \frac{Dens}{Esp} \quad (7)$$

em que $Dens$ se refere à densidade de semeadura (plantas m^{-2}), e Esp ao espaçamento da cultura (m).

Para cada parcela experimental, em cada data de coleta, o coeficiente de extinção foi calculado de acordo com a eq. (2). Analogamente, o coeficiente de extinção de luz médio (k) no ciclo pode ser obtido após o cálculo da t e de IAF médios, ambos obtidos pelas integrais das funções que expressam a relação de dependência destes com Dr , nos limites de 0 a 1, ou seja:

$$\bar{k} = \frac{-\ln\left(\int_0^1 \tau(Dr) \cdot dDr\right)}{\int_0^1 IAF(Dr) \cdot dDr} \quad (8)$$

Os dados de transmitância e de IAF em função de Dr foram ajustados aos modelos logístico e de Gauss, os quais requerem resolução numérica para seus cálculos, quando integrados. Para tanto, dispôs-se do método de Simpson, assumindo pequenos incrementos de $\Delta Dr = 0,01$. O critério de referência para a terminologia dos estádios fenológicos foi baseado naquele constante em FANCELLI e DOURADO NETO (2000).

Resultados e Discussão

Como os resultados foram baseados no desenvolvimento relativo e este no tempo térmico, faz-se necessário, previamente, abordar alguns aspectos cruciais acerca desses conceitos. Mesmo contemplando correções, o método tradicional de cálculo de GD (VILLA NOVA et al., 2005) apresenta a desvantagem de não computar soma térmica quando da ocorrência de temperaturas médias diárias do ar abaixo de 10°C , assumida, por exemplo, como a basal inferior para a cultura do milho (LINDQUIST et al., 2005). Já o método proposto pela função beta contorna essa questão e promove baixos valores de GD quando $T < 10^{\circ}\text{C}$ (Figura 1), visto que pode haver temperaturas acima disso, ao longo do dia, o suficiente para promover desenvolvimento vegetal; e computa zero para GD apenas quando T é menor ou igual TD_{\min} , ou, ainda, quando T é igual ou superior a TD_{\max} . Para um intervalo entre 10 e 35°C , os modelos revelam certa paridade. Para valores compreendidos entre 26 e 35°C , por exemplo, o método beta superestima GD em relação ao método

tradicional, o que pode ser plenamente justificado pelo fato de esses valores estarem mais próximos aos ótimos para desenvolvimento da cultura. Acima de 35°C , GD sofre declínio, o que seria condizente com um declínio na taxa de desenvolvimento da cultura a partir desse valor de temperatura.

A Figura 1 assume um formato similar àquele apresentado por PEREIRA et al. (2002; p.332) para a taxa de desenvolvimento da cultura, alterando-se apenas a magnitude dos valores de temperatura. Se essa taxa é linearmente proporcional ao conceito de graus-dia, a Figura 1 pode ser assumida para representar seu processo. Na presente análise, os valores de GDA_j encontrados até o pleno florescimento (55 DAE) e até o ponto de maturidade fisiológica (110 DAE) foram $688,29^{\circ}\text{C dia}$ (contra $746,48$, pelo método tradicional de cálculo de GD) e $1392,82^{\circ}\text{C dia}$ (contra $1515,09$, pelo método tradicional), respectivamente. Este último valor, obtido pela função beta, será adotado como referência para representar o fim do ciclo (GDA_{pmp}), para o híbrido DKB-390, conforme requerido pela eq. (4). O tempo verificado entre a emergência e o pleno florescimento (60 dias) pode ter sido levemente mais curto em relação ao ideal, já que, para cada unidade de temperatura média diária superior a $21,1^{\circ}\text{C}$, nesse período, pode haver uma antecipação de dois a três dias no tempo necessário para o florescimento (FANCELLI e DOURADO NETO, 2000; p.24). Já entre o florescimento e o ponto de maturidade fisiológica, no entanto, temperaturas médias diárias superiores a 26°C são necessárias para acelerar o tempo para a finalização do ciclo da cultura.

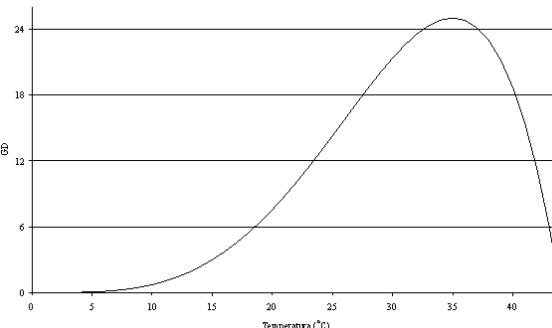


Figura 1. Relação entre temperatura média diária do ar e graus-dia, modelada pela função beta.

YAN e HUNT (1999) argumentam que a função beta pode não representar todos os processos vegetais (como fotossíntese, por exemplo), mas reforçam o uso deste modelo ao sugerirem $TD_{\max} = 41^{\circ}\text{C}$ e $T_{op} = 31^{\circ}\text{C}$ como sendo adequados para a maioria dos híbridos de milho, valores estes pouco abaixo daqueles ajustados para o presente estudo, mostrando, ainda, que a função beta representa adequadamente a taxa de desenvolvimento de folhas, que, neste trabalho, guarda relações com o índice de área foliar, que, por sua vez, com o coeficiente de extinção de luz.

Para todo o ciclo da cultura, a Figura 2 mostra a variação temporal do *IAF* e da transmitância para os dois grupos de tratamentos, sendo um deles não submetido à segunda cobertura em V8, que proveu adicionais 30 kg (N) ha⁻¹, já considerando uma eficiência de 60%. Observa-se um curso natural do rápido desenvolvimento do *IAF* entre o estádio V4 (19 DAE) e o pleno florescimento (55 DAE), concomitantemente a um rápido declínio na transmitância, nesse período. Os maiores valores de *IAF* foram iguais a 5,55 e 5,73 (média das parcelas), para N60 e N90, respectivamente, e foram observados aos 46 DAE (três dias após a emissão do pendão). A aplicação de fungicidas, assim como a interação entre estes e o nitrogênio, não resultou em diferenças significativa nos padrões de variação de *IAF* entre N60 e N90. Apenas o fator nitrogênio, de forma isolada, promoveu diferenças marcantes nos valores de área foliar coletados em 81 e 95 DAE (a análise de variância para cada data de coleta pode ser fornecida sob pedido). A segunda cobertura pode ter favorecido os padrões de alocação de N para N90 (YIN et al., 2003), promovendo melhor manutenção do *IAF* e alterando levemente o valor de *k*.

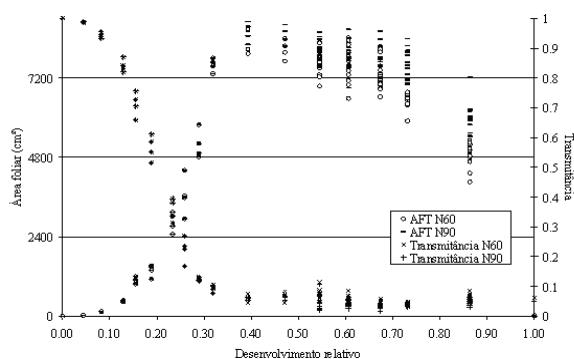


Figura 2. Variação temporal do índice de área foliar (*IAF*) e da transmitância por nível de adubação nitrogenada, ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura.

Para ambos os grupos de tratamentos (submetidos ou não à segunda cobertura), os dados de área foliar por planta (*AFT*, cm² folha verde), em função do desenvolvimento relativo, foram ajustados ao modelo de Gauss:

$$AFT(Dr) = \gamma_1 \cdot e^{-0,5 \left(\frac{Dr - \gamma_2}{\gamma_3} \right)^2} \quad (9)$$

em que γ_1 , γ_2 e γ_3 são os parâmetros empíricos do modelo. As análises estatísticas dos modelos explanatórios de *AF* em função de *Dr* são apresentadas nas Tabelas 1 e 2.

O modelo explanatório de Gauss superestima a área foliar entre a emergência e o estádio V4, e a subestima entre este e o florescimento, além de revelar a ocorrência da área foliar máxima (representada pelo parâmetro γ_1) em um momento mais avançado do desenvolvimento relativo (representado pelo parâmetro γ_2), quando comparado com a ocorrência original. Por esse motivo, esse modelo pode não servir para extrapolar os valores de área foliar em função de *Dr*, mas serve para a obtenção da duração relativa de área foliar (*DAF*), que visa quantificar a vitalidade do aparelho fotossintético e toda a oportunidade de assimilação da cultura mediante o quanto de área foliar se desenvolveu associado à sua duração, denotando a área foliar por estação de cultivo. Integrando-se a eq. (9) e levando-se em consideração a eq. (7), do desenvolvimento relativo inicial até o final (*Dr* = 1).

$$DAF = 10^{-4} \cdot \frac{Dens}{Esp} \cdot \int_0^1 \gamma_1 \cdot e^{-0,5 \left(\frac{Dr - \gamma_2}{\gamma_3} \right)^2} \cdot dDr \quad (10)$$

A vantagem de usar como referência o desenvolvimento relativo é que as integrais serão sempre resolvidas sem o denominador, que será sempre igual a 1 (referente ao comprimento total do ciclo ser *Dr* = 1). Se a eq. (10) é dividida pelo ciclo total da cultura (*Dr* = 1), obtém-se o *IAF* médio (*IAF_m*) ao longo do ciclo, fazendo com que *DAF*, quando baseado em *Dr*, represente-o diretamente, pois:

$$IAF_m = \frac{DAF}{1} \quad (11)$$

Pelo método numérico de Simpson para a resolução da eq. (10):

$$IAF_m = IAF_{max} \cdot \left(\frac{\Delta_{Dr}}{3} \right) \cdot (U_0 + 4 \cdot U_1 + 2 \cdot U_2 + \dots + 2 \cdot U_{n-2} + 4 \cdot U_{n-1} + U_n) \quad (12)$$

Em que:

$$U_i = e^{-0,5 c^{-2} \cdot (i \cdot Dr_i - b)^2} \quad (13)$$

Ao assumir que $\Delta_{Dr} = 0,01$, obtém-se 10000 incrementos, fazendo com que a eq. (11) resulte em um *IAF* médio de 3,1603, para N60, e de 3,3488, para N90; ou seja, o *IAF* médio ao longo do ciclo foi aproximadamente 5,97% maior para as parcelas que receberam a segunda cobertura de nitrogênio.

Tanto para o grupo submetido à segunda cobertura quanto para o não submetido, os dados de transmitância em função do desenvolvimento relativo foram ajustados ao seguinte modelo sigmóide:

(14)

em que b_1 , b_2 , b_3 e b_4 são os parâmetros empíricos do modelo. Para as duas situações de adubação nitrogenada, as análises estatísticas dos modelos explanatórios de *t* em função de *Dr* são apresentadas nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 1. Parâmetros do modelo estatístico obtido para a área foliar, em função do desenvolvimento relativo dos tratamentos não submetidos à segunda cobertura.

Parâmetro	valor	Erro padrão	Valor-t	Intervalo de confiança (95%)
				Limite inferior Limite superior
g_1	8341,531663	152,5498242	54,68070322*	8039,876908 8643,186418
g_2	0,557157616	0,006090377	91,48163120*	0,545114396 0,569200837
g_3	0,236025013	0,005924399	39,83948904*	0,224310002 0,247740025
Geral:	Valor-F = 552,44966955; $r^2 = 0,8889692868$.			

*Significativo a 1% de probabilidade.

Tabela 2. Parâmetros do modelo estatístico obtido para a área foliar, em função do desenvolvimento relativo dos tratamentos submetidos à segunda cobertura.

Parâmetro	valor	Erro padrão	Valor-t	Intervalo de confiança (95%)
				Limite inferior Limite superior
g_1	8654,915764	173,2159791	49,96603551*	8312,395384 8997,436144
g_2	0,575835117	0,007205427	79,91686257*	0,561586977 0,590083257
g_3	0,243721625	0,006973879	34,94778581*	0,229931352 0,257511898
Geral:	Valor-F = 422,00913469; $r^2 = 0,8594730828$.			

*Significativo a 1% de probabilidade.

Tabela 3. Parâmetros do modelo estatístico obtido para a transmitância, em função do desenvolvimento relativo dos tratamentos não submetidos à segunda cobertura.

Parâmetro	valor	Erro padrão	Valor-t	Intervalo de confiança (95%)
				Limite inferior Limite superior
b_1	0,053963403	0,001895541	28,46860926*	0,050214889 0,057711917
b_2	0,958123614	0,009774216	98,02561868*	0,938794675 0,977452554
b_3	0,193493636	0,001567412	123,4478531*	0,190394011 0,196593262
b_4	-0,04343900	0,001160813	-37,4211728*	-0,04573456 -0,04114344
Geral:	Valor-F = 9697,1241916; $r^2 = 0,9953127736$.			

*Significativo a 1% de probabilidade.

Tabela 4. Parâmetros do modelo estatístico obtido para a transmitância, em função do desenvolvimento relativo dos tratamentos submetidos à segunda cobertura.

Parâmetro	valor	Erro padrão	Valor-t	Intervalo de confiança (95%)
				Limite inferior Limite superior
b_1	0,045883967	0,001823323	25,16502879	0,042278267 0,049489667
b_2	0,968964757	0,09525704	101,7210689	0,950127263 0,987802252
b_3	0,194191774	0,001525084	127,3318131	0,191175853 0,197207695
b_4	-0,04432698	0,001127364	-39,3191291	-0,04655639 -0,04209757
Geral:	Valor-F = 10728,055611; $r^2 = 0,9957612916$.			

*Significativo a 1% de probabilidade.

O parâmetro b_1 representa o valor de transmitância mínima, ocorrente quando o aparato fotossintético encontra-se interceptando quase toda radiação incidente no topo da vegetação. Já o parâmetro b_3 se refere ao valor de desenvolvimento relativo no qual a transmitância por unidade de desenvolvimento, função caracterizada pela primeira derivada da eq. (14), é mínima, tendo isso ocorrido logo após o estádio V4. Não foi encontrado significado físico-biológico para os demais parâmetros, embora a diferença ($b_3 - b_4$) tenha resultado num valor muito próximo àquele da intercepção média do ciclo, calculada como sendo igual a 0,2345, para o caso dos tratamentos submetidos à segunda cobertura.

Os cálculos obtidos para o coeficiente de extinção ao longo do desenvolvimento foram muito variáveis para ambos os grupos de tratamentos de adubação nitrogenada, não tendo sido encontrada uma relação de dependência característica entre as k e Dr ou IAF ; em contraste aos resultados de MEINKE (1996), o qual obteve um decréscimo de k em função do ciclo da cultura do trigo, muito acentuado nos estádios iniciais (por exemplo, para $IAF < 1$) e tendendo a ser constante após isso. Sem que houvesse muitas diferenças em relação ao uso de k variável, este fato reforçou a possibilidade de uso de um valor médio de k para simular a produção de trigo em condições de suprimento hídrico adequado, já que o rápido desenvolvimento da área foliar dos

estádios subsequentes veio a compensar a produção de biomassa e o rendimento final de grãos.

Ao integrar a eq. (14) de maneira análoga à eq. (9), e, posteriormente, dividir o valor encontrado pelo desta última, obtiveram-se, para o genótipo DKB 390, os valores dos coeficientes de extinção médios de 0,4517 e 0,4329, para N60 e N90, respectivamente. Esses valores são úteis como variáveis de entrada em modelos de simulação, principalmente o valor encontrado para N90, já que essa situação de suprimento de nitrogênio é condizente com a realidade de lavouras conduzidas sob elevadas populações e com adequado suprimento hídrico. De uma forma geral, SMITH et al. (2004) propõem valores práticos para k variando entre 0,4 e 0,6. O programa computacional APSIM 5.2 (APSRU, 2007) utiliza o valor fixo em 0,45 e facilita ao usuário a alteração deste valor em função de resultados experimentais mais específicos. Não foram encontrados, na literatura disponível, trabalhos que relatassem a determinação de k especificamente para o híbrido DKB 390.

Durante o experimento, a não remoção de material foliar senescente ao longo do ciclo pode ter colaborado com a variabilidade inconsistente (tendendo ao aumento) nos valores de k , nas fases posteriores ao florescimento, pois o conceito de interceptação leva em conta apenas a área foliar verde, que é ativa para a produção de fotoassimilados. LINDQUIST et al. (2005) constataram um processo semelhante, tendo calculado, para a cultura do milho, utilizando a eq. (8), valores médios de k iguais a 0,49, entre a emergência e a antese, mas elevados para 0,67, durante a fase de enchimento de grãos. Para modelos de simulação referentes à cultura de milho, LIZASO et al. (2005) apresentam equações de correção para esta variabilidade, porém levam em conta também a mensuração das folhas não verdes. Para trabalhos futuros para a cultura do milho, sugere-se a remoção do material morto anteriormente à mensuração da transmitância, na tentativa de minimizar a variabilidade de k , principalmente após o início do florescimento.

O maior valor de coeficiente de extinção médio encontrado para a situação de suprimento subótimo de nitrogênio é consistente com a menor produção de grãos correspondente, haja vista que menores valores de k resultam numa distribuição da radiação incidente por maior área foliar, o que proporciona maiores taxas de fotossíntese, conforme abordado por BERNARDES (1987). Os tratamentos que receberam a segunda cobertura produziram, em média, 10472,50 kg (grãos) ha⁻¹, contra 9849,96 dos que não receberam, ressaltando que apenas o fator isolado "nitrogênio" resultou em diferenças significativas na produção, conforme os dados de análise de variância apresentados em DETOMINI (2008).

Por ter proporcionado maior manutenção da área foliar verde durante a fase de enchimento de grãos, os

tratamentos que receberam a segunda cobertura puderam permanecer por mais tempo com maiores inclinações no ângulo foliar, conferindo menor valor para k e, consequentemente maior produção de carboidrato bruto. ALLEN et al. (1964) demonstraram que a fotossíntese potencial diminui conforme aprofunda-se verticalmente no dossel. Assim, mesmo pouco ativas, as folhas inferiores em senescência, mais "planófilas" e levando a um k maior, podem também ter contribuído (mas em menor proporção), em termos de interceptação de luz, para a quebra de produção nos tratamentos que não receberam a segunda cobertura.

Independente do valor de k , que é uma consequência da inclinação angular de cada folha e da distribuição dessas inclinações, híbridos mais erectófilos podem permitir que uma maior população de plantas (em relação à agricultura de sequeiro) seja adotada na semeadura, vindo a exigir, por definição, também um adequado suprimento hídrico para atender à maior demanda de água. Independente do híbrido, este deve ser posicionado corretamente em relação à época de semeadura, em uma determinada região com seu particular regime de temperaturas, para que a definição do aparato fotossintético não seja antecipada ou postergada e altere os valores de k , além de, substancialmente, a produção de grãos.

Conclusões

O coeficiente de extinção de luz médio ao longo do ciclo do genótipo de milho avaliado foi superior em condições reduzidas de suprimento de nitrogênio. Para elevadas populações do híbrido DKB 390 se desenvolvendo em condições de suprimento hídrico e de nitrogênio não limitantes, o valor de k igual a 0,43 pode ser adotado em modelos de simulação de rendimento de grãos.

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) a concessão de bolsa de doutorado ao primeiro autor.

Referências Bibliográficas

- ALLEN, L. H.; YOCUM, C. S.; LEMON, E. R. Photosynthesis under field conditions. VII. Radiant energy exchanges within a corn canopy and implications in water use efficiency. *Agronomy Journal*, Madison, v. 56, p. 253-259, 1964.
- ROBERTSON, M.; CARBERRY, P.; KATING, B.; HUTH, N. **The APSIM maize module** (Maize). Toowoomba: APSRU, [19--?]. Disponível em: http://www.apsim.info/apsim/Publish/apsim/maize/docs/mazie_science.htm Acesso em: 13 jul. 2007.

- BERNARDES, M. S. Fotossíntese no dossel das plantas cultivadas. In: CASTRO, P. R. C.; FERREIRA, S. O.; YAMADA, T. (Ed.). **Ecofisiologia da produção agrícola**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1987. Cap. 2, p.13-48
- BONHOMME, R. Bases and limits to using 'degree day' units. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 13, p. 1-10, 2000.
- FANCELLI, A. L.; DOURADO NETO, D. **Produção de milho**. Guaíba: Agropecuária, 2000. 360 p.
- JONES, C. A.; KINIRY, J. R. **CERES-Maize**: a simulation model of maize growth and development. Houston: Texas A&M University Press, 1986. 194 p.
- KEATING, B. A.; CARBERRY, P. S.; HAMMER, G. L.; PROBERT, M. E.; ROBERTSON, M. J.; HOLZWORTH, D.; HUTH, N. I.; HARGREAVES, J. N. G.; MEINKE, H.; HOCHMAN, Z.; McLEAN, G.; VERBURG, K.; SNOW, V.; DIMES, J. P.; SILBURN, M.; WANG, E.; BROWN, K. L.; BRISTOW, S.; CHAPMAN, S.; McCOWN, R. L.; FREEBAIRN, D. M.; SMITH, C. J. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 18, p. 267-288, 2003.
- LINDQUIST, J. L.; ARKEBAUER, T. J.; WALTERS, D. T.; CASSMAN, K. G.; DOBERMAN, A. Maize radiation use efficiency under optimal growth conditions. **Agronomy Journal**, Madison, v. 97, p. 72-78, 2005.
- LOOMIS, R. S.; CONNOR, D. J. **Crop ecology**: productivity and management in agricultural systems. Cambridge: University Press, 1992. 538 p.
- MEINKE, H. **Improving wheat simulation capabilities in Australia from a cropping perspective**. 1996. 270 f. Thesis (Ph.D.) - Wageningen Agricultural University, Wageningen.
- MEINKE, H.; HAMMER, G. L.; KEULEN, H. van; RABBINGE, R.; KEATING, B. A. Improving wheat simulation capabilities in Australia from a cropping systems perspective: water and nitrogen effects on spring wheat in a semi-arid environment. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 7, p. 75-88, 1997.
- MONSI, M.; SAEKI, T. Über den Lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung für die Stoffproduktion. **Japanese Journal of Botany**, Tokyo, v. 14, p. 22-52, 1953.
- MONTEITH, J. L. Light distribution and photosynthesis in field crops. **Annals of Botany**, London, v. 29, p. 17-37, 1965.
- PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. S. **Agrometeorologia** – fundamentos e aplicações práticas. Guaíba: Agropecuária, 2002. 478 p.
- ROSENBERG, N. J.; BLAD, B. L.; VERMA, S. B. **Microclimate**: the biological environment. New York: J. Wiley, 1983. 495 p.
- RUSSEL, G.; JARVIS, P. G.; MONTEITH, J. L. Absorption of radiation by canopies and stand growth. In: RUSSELL, G.; MARSHALL, B.; JARVIS, P. G. **Plant canopies**: their growth, form and function. Cambridge: Cambridge University, 1989. Cap. 2, p. 21-39. (Society for Experimental Biology Seminar Series, 31).
- SINCLAIR, T. R.; MUCHOW, R. C. Radiation use efficiency. **Advances in Agronomy**, New York, v. 65, p. 215-265, 1999.
- VILLA NOVA, N. A.; DETOMINI, E. R.; DOURADO NETO, D.; PILAU, F. G.; PEDREIRA, C. G. S. Avaliação da produtividade potencial de *Brachiaria ruziziensis* (Germain & Evard) em função de unidades fototérmicas.. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Campinas, v. 13, n. 2, p. 430-436, 2005.
- YIN, X.; KROPFF, M. J.; McLAREN, G.; VISPERAS, R. M. A non linear model for crop development as function of temperature. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 77, p. 1-16, 1995.
- YIN, X.; LATINGA, E. A.; SCHAPENDONK, A. D. H. C. M.; ZHONG, X. Some quantitative relationships between leaf area index and canopy nitrogen content and distribution. **Annals of Botany**, London, v. 91, p. 893-903, 2003.
- YAN, W.; HUNT, L. A. An equation for modelling the temperature response of plants using only the cardinal temperatures. **Annals of Botany**, London, v. 84, p. 607-614, 1999.