

PADRÕES DE INTERCEPTAÇÃO DE RADIAÇÃO SOLAR POR CAFEZEIROS EM FUNÇÃO DA ÁREA FOLIAR

Felipe Gustavo Pilau¹, Luiz Roberto Angelocci²

(Recebido: 11 de junho de 2015; aceito: 28 de agosto de 2015)

RESUMO: Objetivou-se, no presente trabalho, avaliar alterações nos padrões de interceptação de radiação solar pela copa de cafeeiros, em consequência da variação do índice de área foliar por desfolhas, determinando-se relações da eficiência de interceptação e do coeficiente de extinção da radiação da copa, com a variação de área foliar. Adicionalmente, estimar a radiação solar interceptada pelos cafeeiros e comparar a valores medidos por radiometria. O mesmo modelo teórico usado para determinar o coeficiente de extinção 'k' (Teoria de Monsi & Saeki) foi usado, também, para a estimativa da radiação solar interceptada (K^*). Os dados revelaram uma clara interferência das estruturas de sustentação das folhas, sobre a eficiência de interceptação da radiação solar (ϵ_{int}), com valor mínimo de 0,34 com ausência completa de folhas. Os resultados também foram distintos, em relação à obtenção do coeficiente de extinção 'k', mais uma vez com influência do tronco e ramos plagiotrópicos. As simulações de K^* confrontadas às medições apresentaram boa correlação, tanto na escala de 15 min, como diária. Conforme o índice de Willmott (d), o uso do coeficiente k obtido por ajuste quadrático tornou as estimativas mais exatas.

Termos para indexação: *Coffea arabica* L., índice de área foliar, eficiência de interceptação, coeficiente de extinção.

ASSESSING THE COFFEE CANOPY LIGHT ABSORTION BASED ON THE LEAF AREA

ABSTRACT: The study evaluated solar radiation interception patterns (K^*) defining the relations of interception efficiency (ϵ_{int}) and extinction coefficient (k) of coffee trees (cv. Obatã IAC 1669-20) under leaf area changes. Aiming to determine these interactions for coffee plants (3 years old) under manual defoliations, solar radiation transmitted was measured with two tube solarimeters placed at ground level below the crowns. A canopy-light interception model was derived using the extinction coefficient approach (Monsi & Saeki theory) to assess with independent data to estimate K^* . Under absence of leaves, an intense interference of leaves supporting structures over ϵ_{int} was observed, with a minimum value of 0.34. The results were also distinct for obtaining k. The derived model well simulated the K^* against measurements, with Willmott index as high as 0.92, improving modeling accuracy using 'k' from quadratic fit.

Index terms: *Coffea arabica* L., leaf area index, interception efficiency, extinction coefficient.

1 INTRODUÇÃO

Em dosseis descontínuos, como cafezais, formados por linhas de plantio que compõem contínuos vegetais (renques), a atenuação da radiação solar forma um gradiente vertical de irradiância na copa (CUNHA; VOLPE, 2010; MARIN et al., 2003) e, adicionalmente, um gradiente horizontal, em função das dimensões dos renques e do ângulo de incidência da radiação solar (RIGHI et al., 2007).

O gradiente vertical condiciona a produção de fitomassa (JARAMILLO-BOTERO et al., 2010; MARUR; FARIA, 2006; RIGHI et al., 2007) e constitui a maior fonte energética do processo transpiratório da planta exposta à radiação solar (KANTEN; VAAST, 2006; OLIVEIRA et al., 2006; RIGHI et al., 2008). Já o horizontal define a energia disponível ao nível do solo, para o estrato vegetal espontâneo ou cultura intercalar, determinando o aquecimento do solo e a, evapotranspiração e capacidade produtiva dessas áreas (PEZZOPANE; PEDRO JÚNIOR; GALLO, 2005, 2007).

Tais gradientes são continuamente alterados pela disponibilidade de radiação solar na superfície ou pelo crescimento e desenvolvimento dos renques, mudando continuamente as condições micrometeorológicas do cafezal. Em plantas de café, variações da área foliar devido a condições ambientais ou processos de condução e colheita interferem diretamente na interceptação da radiação solar (PILAU; ANGELOCCI, 2014; SIMON; ANGELOCCI, 2014), conseqüentemente, alterando os processos biofísicos envolvidos (GUTIÉRREZ; MEINZER, 1994).

Logo, o entendimento das relações entre a área foliar e interceptação da radiação solar permite o desenvolvimento ou aperfeiçoamento de modelos para simulação do balanço de radiação e seus efeitos. Assim, neste trabalho buscou-se avaliar alterações nos padrões de interceptação de radiação solar pela copa de cafeeiros, em consequência da variação do índice de área foliar por desfolhas manuais, determinando-se relações

^{1,2}Universidade de São Paulo - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (USP-ESALQ) - Departamento de Engenharia de Biosistemas/LEB - Av. Pádua Dias, 11 - 13.418-900 - Piracicaba - SP - fgpilau@usp.br, lrangelo@usp.br

da eficiência de interceptação e do coeficiente de extinção da radiação da copa com a variação de área foliar. Adicionalmente, procurou-se estimar a radiação solar interceptada pelos cafeeiros e comparar com valores medidos por radiometria.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi conduzido no município de Piracicaba, SP (22°42' S; 47°30' W; 546 m), em um cafezal (*Coffea arabica* L.) cv. Obatã IAC 1669-20, com 3 anos de idade (Tabela 1). O solo da área foi classificado como Nitossolo Vermelho. A coleta de dados foi realizada durante 43 dias, entre 02 de março e 04 de maio de 2005.

O espaçamento entre as plantas de café era de 0,9 m e 3,5 m, respectivamente dentro e entrelinhas, com silhueta da folhagem, na orientação do renque, de formato paralelepípedo, medindo 1,1m de altura x 1,0m de largura. A inserção dos ramos plagiotrópicos, na parte inferior do dossel, começou a 10 cm, a partir do solo. A orientação das linhas de plantio era sudeste-noroeste, com azimute de 161°. O trecho de renque selecionado para o estudo era centralizado no cafezal, com amostragem de 5 plantas na linha, que bem representavam a população do cafezal, quanto a tamanho e área foliar por planta. A área de entrelinhas era coberta por vegetação espontânea, mantida constantemente roçada a ± 10cm de altura. A área de projeção horizontal de cada planta no renque (AP) era de 0,9 m². A área de domínio, por planta (AS), era de 3,15 m².

A partir de análises não destrutivas, foram estimadas as áreas foliares (AF) (eq.1). Para isso, cada planta teve seu número total de folhas (NTF) determinado por contagem manual, procedendo ainda, com uso de régua milimetrada, as medidas do maior comprimento (C) e da maior largura (L) de 100 folhas, aleatoriamente distribuídas entre todos os quadrantes e níveis de altura da copa de cada planta. Assim, considerando o tamanho médio das folhas, a área foliar foi determinada, a partir da eq. 1:

$$AF=C.L.NTF.c \quad (1)$$

onde *c* é um fator empírico, obtido experimentalmente no cafezal e igual a 0,6862 (RIGHI, 2005).

Determinada a área foliar inicial dos cafeeiros, foram executadas desfolhas manuais, a fim de analisar o efeito da folhagem sobre a interceptação da radiação solar. A retirada aleatória

de folhas almejava reduzir, em cada desfolha, cerca de 2,0m² de área foliar por planta, evitando sempre uma retirada concentrada por quadrante ou nível da copa. Do número total de folhas retiradas de cada planta, 20% tinham a largura e o comprimento do limbo medido. Com esses dados, a partir da eq. 1, foi mensurada a área foliar removida e, por subtração, a área foliar restante.

Com os dados de área foliar e a área de domínio de cada planta, foram determinados os valores de índice de área foliar inicial e pós-desfolhas (eq. 2):

$$IAF = \frac{AF}{AS} \quad (2)$$

A partir de fotografias digitais da silhueta (face lateral dos cafeeiros) e uso do software QUANT, foram determinadas as frações percentuais de porosidade ou espaços vazios (*p* %) e de preenchimento (*S*%) da silhueta da copa (folhas+tronco e ramos plagiotrópicos).

Dados da radiação solar global 'Q_g' (piranômetro marca Kipp & Zonen, modelo CM-3) foram coletados no posto meteorológico do Departamento de Engenharia de Biosistemas da ESALQ/USP, distante menos de 200m do experimento. Para mensurar a fração de radiação solar transmitida pelas copas dos cafeeiros (τQ_g) foram usados dois tubo-solarímetros, previamente calibrados, com elemento sensor medindo 245 mm x 25 mm. Os sensores foram posicionados abaixo da folhagem, no sentido das linhas de plantio, nos espaçamentos entre plantas consecutivas do trecho de renque selecionado. As médias de 15 minutos da radiação solar global e da fração de radiação solar transmitida pelas copas dos cafeeiros foram armazenadas por dataloggers (modelos CR1000 e CR23X, marca Campbell).

A radiação solar interceptada (K*) pelos dos cafeeiros foi calculada, a partir das medições da radiação solar global (Q_g) e da fração transmitida (τ.Q_g) através das copas (eq. 3):

$$K^* = Q_g - \tau Q_g \quad (3)$$

A eficiência de interceptação da radiação solar (ε_{int}) foi determinada, a partir do quociente entre a radiação solar interceptada (K*) e a radiação solar global (Q_g) sobre as copas dos cafeeiros (eq. 4):

$$\varepsilon_{\text{int}} = \frac{K^*}{Qg} \quad (4)$$

A partir de valores médios da eficiência de interceptação da radiação solar (ε_{int}) e do índice de área foliar (IAF), foi determinado o coeficiente de extinção (k) do dossel, estimado a partir da Teoria de Monsi & Saeki (eq. 5) (HIROSE, 2005):

$$\ln(1 - \varepsilon_{\text{int}}) = -k \cdot \text{IAF} \quad (5)$$

Rearranjada, a equação 5 foi usada para estimar a interceptação da radiação solar pelas copas dos cafeeiros (K^*_{est}). O modelo foi testado com medições realizadas em intervalos de 15 minutos, e seus valores integrados para o período diurno. Um conjunto independente de dados de medidas da interceptação de radiação solar por cafeeiro (K^*), contemplando todos os IAFs (sem IAF zero), foi utilizado para avaliar o modelo:

$$K^*_{\text{est}} = Qg \cdot (1 - e^{-k \cdot \text{IAF}}) \quad (6)$$

onde: Qg é radiação solar global, k o coeficiente de extinção e IAF é o índice de área foliar.

Para a análise dos resultados foram adotados os indicadores estatísticos: coeficiente de determinação (R^2); coeficiente de correlação (r) e índice de concordância (d) (WILLMOTT et al., 1985).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir da área foliar (AF) inicial dos cafeeiros, de 11,431 m², projetada horizontalmente sobre o solo (AS), tinha-se um índice de área foliar inicial (IAF) de 3,6. Com remoções sequenciais de 15,8%, 18,8%, 23,1% e 30,1%, sempre em relação à área foliar restante a cada momento de intervenção, foram obtidos quatro novos valores de IAF (Tabela 1). Após uma última desfolha, que eliminou totalmente a folhagem (IAF zero), foi possível quantificar isoladamente a interceptação da radiação solar por tronco e ramos plagiotrópicos (Tabela 1).

Para os dias de medida, sempre com tempo seco, a radiação solar global (Qg) teve valor médio máximo de 681,6 W m⁻² ± 197,8 (12:00h) (Figura 1a). Apesar de as medições prolongaram-se por 2

meses, iniciando com uma declinação solar (δ) de -7,53° e finalizando com δ de 16,11°, o decréscimo da radiação solar global não coincidiu exatamente com a redução da área foliar dos cafeeiros. Para o período diurno de alta disponibilidade de energia radiante (10:00 às 14:00h), os maiores valores de radiação solar global foram registrados, para o índice de área foliar de 1,9, enquanto a menor disponibilidade ocorreu para o índice de área foliar de 3,1. Comparativamente, os valores de radiação solar global foram, em média, 30% inferiores àqueles medidos com índice de área foliar de 1,9 (Figura 1b). Variações quanti e qualitativas exercem ação sobre a interceptação e o aproveitamento da radiação solar pela vegetação, inevitavelmente interferindo nos resultados (JARAMILLO et al., 2006; MORAIS et al., 2006; RIGHI et al., 2007).

O aumento da eficiência de interceptação (ε_{int}), em função do índice de área foliar dos cafeeiros, incluindo-se medidas com IAF zero (Figura 2a), possibilitou o ajuste de um modelo logístico, tal como para videiras (CARDOSO et al., 2010), e distinto do padrão de ajuste exponencial observado para cultivos de ciclo anual (BERGAMASCHI et al., 2010; KUNZ et al., 2007; LINDQUIST et al., 2005; MÜLLER; BERGAMASCHI, 2005). Conforme o modelo ajustado (Figura 2a), a partir do IAF 3,3 a eficiência de interceptação estabilizou-se em 0,8, com pequenos acréscimos, a partir desse limite de folhagem. Adicionalmente, a morfologia da copa, em completa desfolha, originou um valor característico de eficiência de interceptação (Figura 2) distinto do observado para cultivos anuais, definindo por uma eficiência de interceptação mínima de 0,338.

As remoções parciais e aleatórias de folhas (Tabela 1) originou o aumento da porosidade da copa dos cafeeiros (S) (Figura 2b), determinando um ajuste quadrático entre as variáveis. O modelo gerado (Figura 2b) evidencia a condição de sobreposição das folhas em função dos altos valores de área foliar, na condição experimental específica, devido ao pequeno volume de copa (0,99m³). Por isso, mesmo com uma remoção de 63,9% do índice de área foliar, passando dos 3,6 para 1,3, a eficiência de interceptação permaneceu em 0,60, apenas 25% abaixo do valor máximo (Figura 2a). Para videira 'Moscato Giallo' (CARDOSO et al., 2010), a sobreposição das folhas das copas acusou um ajuste quadrático entre a eficiência de interceptação e o índice de área foliar, com tendência de decréscimo da eficiência de interceptação da radiação fotossinteticamente ativa, em função da folhagem, muito similar ao observado para os cafeeiros.

TABELA 1 - Fenologia dos cafeeiros, número médio de folhas por planta (n° folhas planta⁻¹) e desvio padrão (\pm), área média do limbo foliar (A_{folha}), área foliar por planta (AF planta⁻¹), índice de área foliar (IAF) e a fração preenchida da silhueta da copa (S, %), inicial (AF_i) e após cada desfolha (AF_{nd}). n representa o número de desfolhas realizadas.

	Fenologia cafezal	n° folhas planta ⁻¹	A_{folha} (m ²)	AF planta ⁻¹	IAF (AS)	S
AF _i	*	2146,6 (\pm 288,47)	0,005325	11,431	3,6	0,84
AF _{1d}	*	1807,1 (\pm 248,59)	0,005325	9,623	3,1	0,83
AF _{2d}	*	1467,6 (\pm 210,08)	0,005325	7,815	2,5	0,82
AF _{3d}	*	1128,1 (\pm 173,87)	0,005325	6,007	1,9	0,78
AF _{4d}	*	788,6 (\pm 141,74)	0,005325	4,200	1,3	0,70
AF _{5d}	*	0,0 (\pm 141,74)	0,005325	0,000	0,0	n.d.

* Vegetação e formação das gemas foliares – indução e maturação das gemas florais. Fonte das descrições fenológicas: Camargo e Camargo (2001). n.d. significa: não determinado

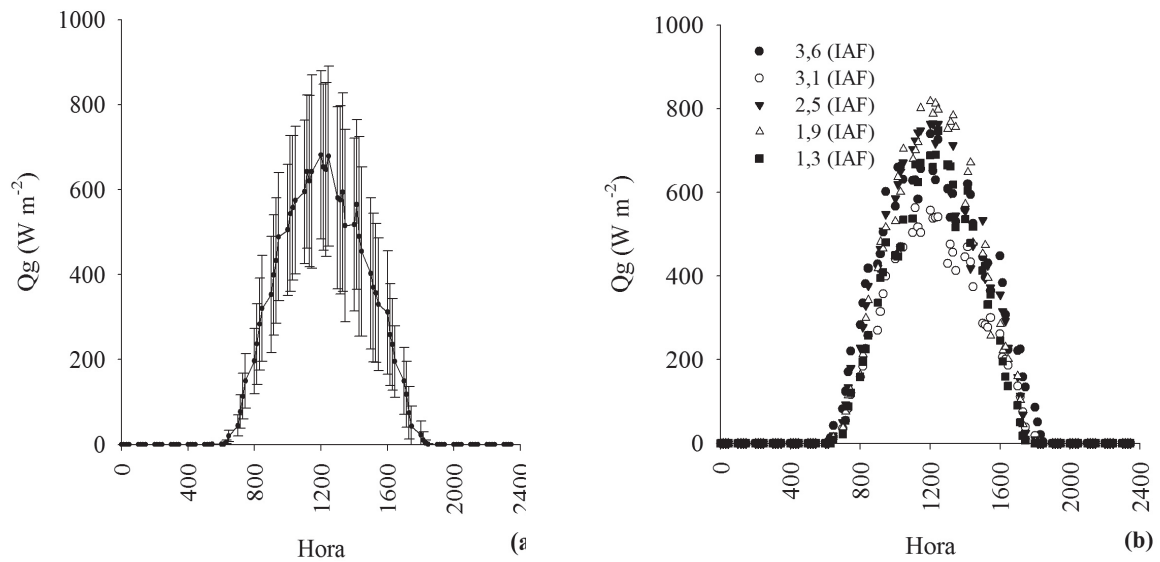


FIGURA 1 - Valores médios e barras de desvio padrão da radiação solar global (Qg), para os dias de medidas (a), e valores médios de Qg, para diferentes valores de IAF dos cafeeiros (b).

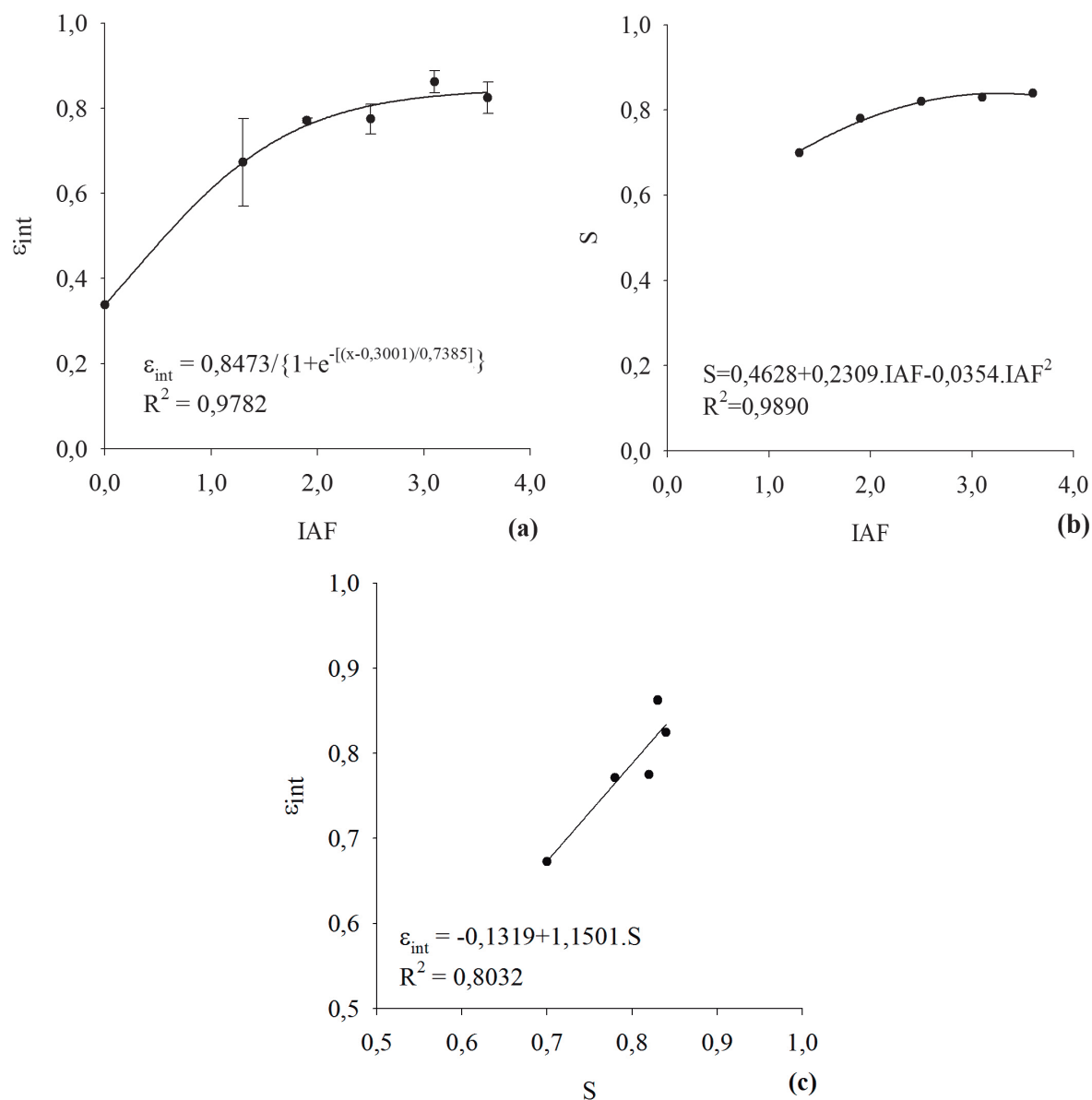


FIGURA 2 - Eficiência de interceptação (e_{int}) da radiação solar (a) e porcentagem de preenchimento da silhueta da copa 'S' (b), em função do IAF, e a relação entre a e_{int} e S (c).

Em função dos padrões de ajuste de eficiência de interceptação (e_{int}) e da porcentagem de preenchimento da silhueta da copa (S), ao índice de área foliar (IAF), a correlação entre as duas primeiras variáveis (Figura 2c) determinou um ajuste linear, com intercepto muito próximo de zero. A partir do coeficiente angular da equação ajustada (Figura 2c), verifica-se que, para o intervalo de porcentagem de preenchimento

da silhueta da copa avaliado (70% a 84%), há uma relação quase unitária de aumento/redução da eficiência de interceptação, em relação à porcentagem de preenchimento da silhueta da copa. Como a porcentagem de preenchimento da silhueta da copa manteve-se alta mesmo após a quarta desfolha, coincidindo com a remoção de 63,9% da folhagem dos cafeeiros (Tabela 1), a exposição direta dos ramos plagiotrópicos à

radiação solar, nessa condição, foi mínima (Figura 3). Deste modo, a contribuição de troncos e ramos para o aumento de eficiência de interceptação pode ser desconsiderada. Com a remoção completa da folhagem, contudo, a influência dessas estruturas sobre a interceptação da radiação solar fica evidente (Figura 2a).

Para dosséis de espécies decíduas, na ausência completa de folhas, até 50% da energia radiante incidente no topo pode ser interceptada (FEDERER, 1971; KONARSKA et al., 2014; LAFLEUR; FARNSWORTH, 2008; LIAKATAS; PROUTSOS; ALEXANDRIS, 2002), seguramente com variações expressivas, em função das características da vegetação, da relação radiação direta/difusa, ângulo zenital e declividade da superfície (FEDERER, 1971; ROWLAND, 1989).

Esses resultados ratificam a dificuldade de estudo da distribuição da radiação solar incidente em dosséis de arbóreas ou florestas, face à rugosidade e não homogeneidade do dossel (proporção entre estruturas de sustentação e folhagem) (Figura 3), fazendo com que, na maioria das vezes, essas estruturas vegetais sejam simplificada e consideradas contínuas e homogêneas (NEROZZI et al., 1997), desconsiderando o índice de área foliar ou fração preenchida da silhueta da copa (Tabela 1), além da sua distribuição vertical, do ângulo de inclinação desses elementos e de suas propriedades óticas, que, conjuntamente, controlam a transferência de energia radiante no dossel (HUTCHINSON et al., 1986).

Para cultivos anuais, o coeficiente de extinção da radiação solar global ou da fração fotossinteticamente ativa (PAR) corresponde ao parâmetro angular (a) da função linear $\ln(1 - \epsilon_{int}) = -k \cdot IAF$ (BERGAMASCHI et al., 2010; CARDOSO et al., 2010). Contudo, para os cafeeiros, a obtenção do coeficiente de extinção (k), a partir da eficiência de interceptação da radiação solar global (ϵ_{int}) e do índice de área foliar (IAF) exibiu resultado diferenciado (Figura 4).

A partir da eficiência de interceptação registrada para IAF zero (Figura 2a) e, conseqüentemente, de um valor negativo do termo $\ln(1 - \epsilon_{int})$ (Figura 4), o ajuste linear alcançado entre as variáveis determinou uma equação com coeficiente linear distinto, igual a -0,5505 (Figura 4a). A correlação entre $\ln(1 - \epsilon_{int})$ e IAF acabou ainda melhor ajustada por uma equação quadrática (Figura 4b), com R^2 mais próximo à unidade.

A estimativa da radiação solar interceptada dos cafeeiros (K^*_{est}), a partir do modelo de Beer e coeficientes de extinção (k) obtidos (Figura 4), acabaram por subestimar as medidas (K^*) em menos de 10%, tanto na escala temporal de 15 minutos, quanto na diária (Figura 5). Dados estimados, quando confrontados às medições, independente do coeficiente de extinção adotado (Figura 4) apresentaram boa correlação (r). Conforme o índice de Willmott (d), o uso do coeficiente de extinção obtido por ajuste quadrático tornou o modelo de estimativa mais exato. Resultados satisfatórios dessa proposta de estimativa da radiação solar interceptada (K^*) para espécies arbóreas também foram obtidos por Jackson e Palmer (1979), para macieiras, Angelocci et al. (2008), para cafeeiros e Simon (2010), para cafeeiros e limeira ácida Tahiti.

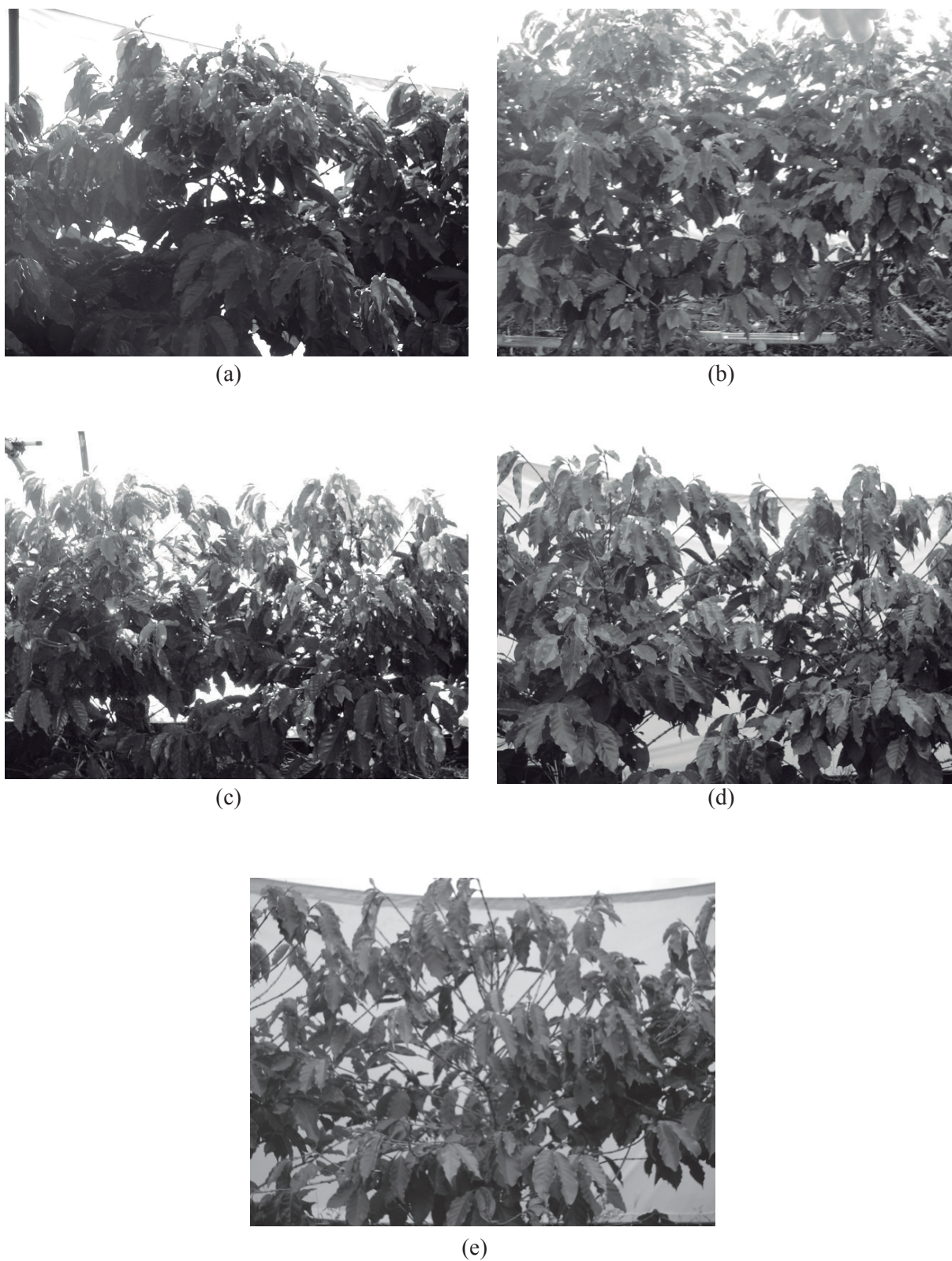


FIGURA 3 - Vistas parciais laterais das copas dos cafeeiros, empregadas na determinação da fração preenchida da silhueta da copa (S %), com IAF de 3,6 (a), 3,1 (b), 2,5 (c), 1,9 (d) e 1,3 (e).

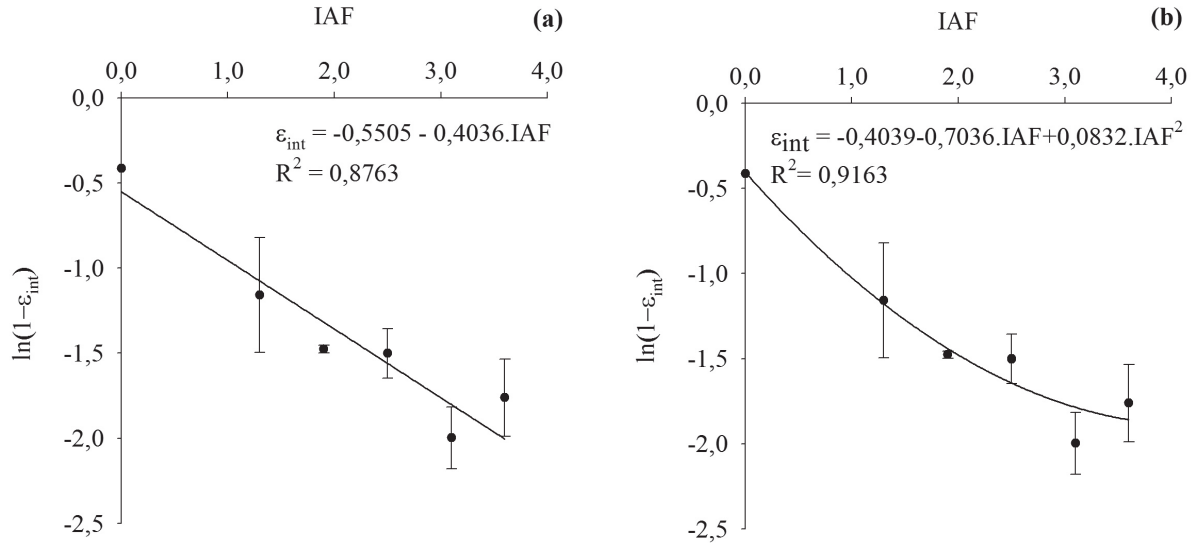


FIGURA 4 - Coeficiente de extinção para radiação solar global, em função do índice de área foliar (IAF) das copas de cafeeiros, por ajustes lineares (a) e quadrático (b). As barras indicam o desvio padrão.

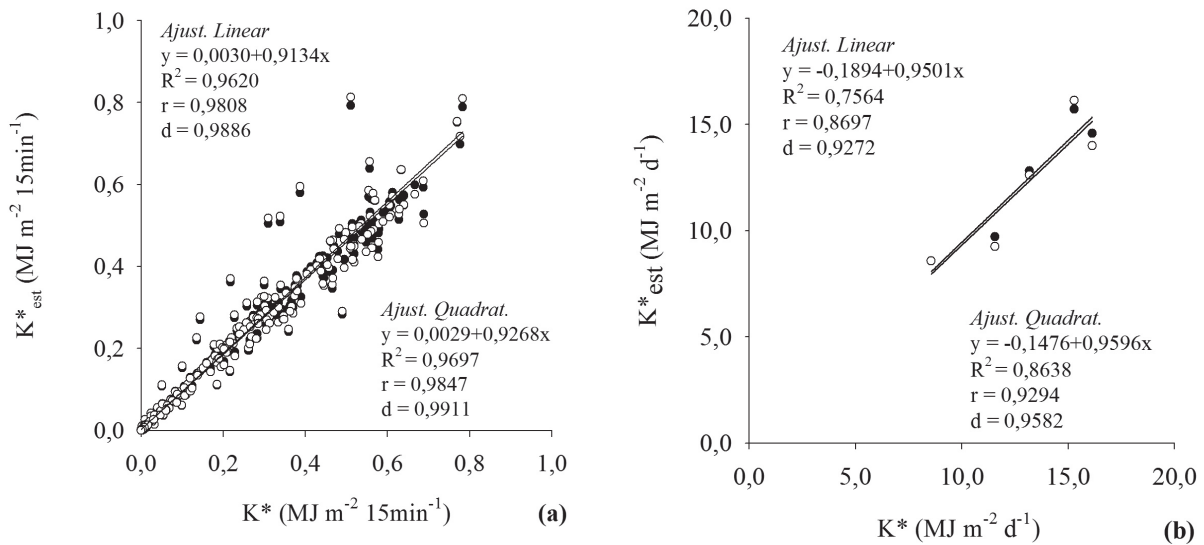


FIGURA 5 - Correlações entre a radiação solar interceptada estimada (K^*_{est}) e a medida (K^*) da copa de cafeeiro, com diferentes valores de IAF, a partir dos coeficientes k , ajustados de forma quadrática (*Ajust. Quadrat.*) ou linear (*Ajust. Linear*).

4 CONCLUSÕES

Medições radiométricas evidenciam o autossombreamento das folhas na copa dos cafeeiros, revelando uma eficiência de interceptação da radiação solar (e_{int}) de 80% já com um IAF de 2,5, e um valor mínimo de mais de 30%, na ausência completa de folhagem.

O modelo proposto, fundamentado na Teoria de Monsi & Saeki, mostrou desempenhos que o qualificam plenamente para a estimativa da interceptação de radiação solar, pela copa do cafeeiro.

5 REFERÊNCIAS

- ANGELOCCI, L. R. et al. Radiation balance of coffee hedgerows. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 12, n. 3, p. 274-281, 2008.
- BERGAMASCHI, H. et al. Intercepted solar radiation by maize crops subjected to different tillage systems and water availability levels. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 45, n. 12, p. 1331-1341, dez. 2010.
- CAMARGO, Â. P. de; CAMARGO, M. B. P. de. Definição e esquematização das fases fenológicas do cafeeiro arábica nas condições tropicais do Brasil. **Bragantia**, Campinas, v. 60, n. 1, p. 65-68, 2001.
- CARDOSO, L. S. et al. Padrões de interceptação de radiação solar em vinhedos com e sem cobertura plástica. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 32, n. 1, p. 161-171, 2010.
- CUNHA, A. R.; VOLPE, C. A. Relações radiométricas no terço superior da copa de cafeeiro. **Bragantia**, Campinas, v. 69, n. 2, p. 263-271, 2010.
- FEDERER, C. A. Solar radiation absorption by leafless hardwood forests. **Agricultural Meteorology**, Amsterdam, v. 9, p. 3-20, 1971.
- GUTIÉRREZ, M. V.; MEINZER, F. C. Energy balance and latent heat flux in coffee hedgerows at different stages of canopy development. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 68, p. 173-186, 1994.
- HIROSE, T. Development of the Monsi-Saeki theory on canopy structure and function. **Annals of Botany**, London, v. 95, n. 3, p. 483-494, 2005.
- HUTCHISON, B. A. et al. The architecture of an east Tennessee deciduous forest canopy. **Journal of Ecology**, London, v. 74, n. 3, p. 635-646, 1986.
- JACKSON, J. E.; PALMER, J. W. A simple model of light transmission and interception by discontinuous canopies. **Annals of Botany**, London, v. 44, p. 381-383, 1979.
- JARAMILLO, R. A. et al. La radiación solar; consideraciones para su estudio en las plantaciones de café (*Coffea arabica* L.). **Meteorologia Colombiana**, Bogotá, n. 10, p. 12-22, 2006.
- JARAMILLO-BOTERO, C. et al. Production and vegetative growth of coffee trees under fertilization and shade levels. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 67, n. 6, p. 639-645, 2010.
- KANTEN, R. van; VAAST, P. Transpiration of arabica coffee and associated shade tree species in sub-optimal, low-altitude conditions of Costa Rica. **Agroforestry Systems**, Berlin, v. 67, p. 187-202, 2006.
- KONARSKA, J. et al. Transmissivity of solar radiation through crowns of single urban trees-application for outdoor thermal comfort modelling. **Theoretical and Applied Climatology**, Berlin, v. 117, p. 363-376, 2014.
- KUNZ, J. H. et al. Uso da radiação solar pelo milho sob diferentes preparos do solo, espaçamento e disponibilidade hídrica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 11, p. 1511-1520, nov. 2007.
- LAFLEUR, P. M.; FARNSWORTH, A. G. Light interception and canopy radiation balance of staghorn sumac (*Rhus typhina*). **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 38, p. 1695-1700, 2008.
- LIAKATAS, A.; PROUTSOS, N.; ALEXANDRIS, S. Optical properties affecting the radiant energy of an oak forest. **Meteorological Applications**, Reading, v. 9, p. 433-436, 2002.
- LINDQUIST, J. L. et al. Maize radiation use efficiency under optimal growth conditions. **Agronomy Journal**, Madison, v. 97, p. 72-78, 2005.
- MARIN, F. R. et al. Solar radiation interception and its relation with transpiration in different coffee canopy layers. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 11, n. 1, p. 1-6, 2003.

- MARUR, C. J.; FARIA, R. T. de. Photosynthesis of individual leaves in a coffee plant. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 28, n. 3, p. 331-335, 2006.
- MORAIS, H. et al. Microclimatic characterization and productivity of coffee plants grown under shade of pigeon pea in Southern Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 5, p. 763-770, maio 2006.
- MÜLLER, A. G.; BERGAMASCHI, H. Eficiências de interceptação, absorção e de uso da radiação fotossinteticamente ativa pelo milho (*Zea mays* L.), em diferentes disponibilidades hídricas. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 13, n.1, p. 27-33, 2005.
- NEROZZI, F. et al. Light transmittance and sunlit leaf area estimation in a peach canopy. **The Journal of Horticultural Science & Biotechnology**, Ashford, v. 72, n. 2, p. 271-283, 1997.
- OLIVEIRA, C. R. M. de et al. Trocas gasosas de cafeeiros (*Coffea arabica* L.) e seringueiras (*Hevea brasiliensis* Muell. Arg.) em diferentes sistemas de cultivo na região de Lavras, MG. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 30, n. 2, p. 197-206, 2006.
- PEZZOPANE, J. R. M.; PEDRO JÚNIOR, M. J.; GALLO, P. B. Caracterização microclimática em cultivo consorciado café/banana. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 3, p. 256-264, 2007.
- _____. Radiação solar e saldo de radiação em cultivo de café a pleno sol e consorciado com banana prata anã. **Bragantia**, Campinas, v. 64, n. 3, p. 485-497, 2005.
- PILAU, F. G.; ANGELOCCI, L. R. Balanço de radiação de copas de cafeeiros em renques e suas relações com radiação solar global e saldo de radiação de gramado. **Bragantia**, Campinas, v. 73, n. 3, p. 1-10, 2014.
- RIGHI, C. A. **Avaliação ecofisiológica de cafeeiro (*Coffea arabica* L.) em sistema agroflorestal e em monocultivo**. 2005. 101 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 2005.
- RIGHI, C. A. et al. Coffee water use in agroforestry system with rubber trees. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 32, n. 5, p. 781-792, set./out. 2008.
- _____. Measurement and simulation of solar radiation availability in relation to the growth of coffee plants in an agroforestry with rubber trees. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 31, n. 2, p. 195-207, 2007.
- ROWLAND, J. D. **Modelling solar irradiance on a slope under a leafless deciduous forest**. 1989. 137 f. Thesis (Master of Science) - McGill University, Montréal, 1989.
- SIMON, J. **Medições do saldo de radiação em copas de cafeeiros e limeiras ácidas por sistemas de integração espaço-temporal e estimativas por técnicas de modelagem**. 2010. 112 f. Tese (Doutorado em Ciências) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 2010.
- SIMON, J.; ANGELOCCI, L. R. Saldo de radiação em cafeeiros e limeiras: relações com saldo de radiação de gramado e radiação global. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 12, p. 1218-1227, 2014.
- WILLMOTT, C. J. et al. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Malden, v. 90, n. 5, p. 8995-9005, 1985.