

# ALBEDO E ESTIMATIVAS DO SALDO DE RADIAÇÃO EM FEIJÃO-VAGEM SOB COBERTURA DE PLÁSTICO E AMBIENTE EXTERNO<sup>1</sup>

JOSÉ LEONALDO DE SOUZA<sup>2</sup>, JOÃO FRANCISCO ESCOBEDO<sup>3</sup> e MARIA TEREZINHA TROVARELI TORNERO<sup>4</sup>

RESUMO - Este trabalho objetivou determinar o albedo ( $r$ ) no espectro solar e estimar o saldo de radiação, em ambientes cultivados com feijão-vagem (*Phaseolus vulgaris* L.), em condições de campo e em casa de vegetação com cobertura de polietileno, em Botucatu, SP, (22° 54' S; 48° 27' W; 850 m). A irradiância solar global ( $R_g$ ) e a radiação solar refletida ( $R_r$ ) foram utilizadas na determinação do albedo através da razão entre  $R_r$  e  $R_g$ . Curvas diurnas de  $r$  foram traçadas para dias com céu parcialmente nublado e claro, em fases fenológicas da cultura. Os valores do albedo diurno, obtidos através dos totais de radiações, foram utilizados para analisar a variação desse índice durante o ciclo da cultura, nos dois ambientes. O albedo variou com a elevação solar, o ambiente e as fases fenológicas da cultura. A variação de nebulosidade praticamente não influenciou sobre o albedo, para totais diurnos. As estimativas do saldo de radiação nas fases vegetativa, reprodutiva e no ciclo da cultura, foram realizadas por meio de regressões lineares simples, tendo como variáveis independentes a irradiância solar global ( $R_g$ ) e o saldo de radiação de ondas curtas ( $R_c$ ). Todas as estimativas de radiações apresentaram um melhor ajustamento para fases fenológicas que para o ciclo como um todo. O saldo de radiação ( $R_n$ ), em condições de campo, ficou bem estimado pela irradiância solar global e o saldo de ondas curtas. O saldo de radiação interno ( $R_{nI}$ ) à casa de vegetação mostrou-se satisfatoriamente estimado pela irradiância global externa ( $R_{gE}$ ).

Termos para indexação: *Phaseolus vulgaris*, radiação solar.

## ALBEDO AND ESTIMATES OF NET RADIATION FOR GREEN BEANS UNDER POLYETHYLENE COVER AND FIELD CONDITIONS

ABSTRACT - This paper describes the albedo ( $r$ ) and estimates of net radiation and global solar irradiance for green beans crop (*Phaseolus vulgaris* L.), cultivated in greenhouse with cover of polyethylene and field conditions, in Botucatu, SP, Brazil (22° 54' S; 48° 27' W; 850 m). The solar global irradiance ( $R_g$ ) and solar reflected radiation ( $R_r$ ) were used to estimate the albedo through the ratio between  $R_r$  and  $R_g$ . The diurnal curves of albedo were obtained for days with clear sky and partially cloudy conditions, for different phenological stages of the crop. The albedo ranged with the solar elevation, the environment and the phenological stages. The cloudiness range have almost no influence on the albedo diurnal amount. The estimation of radiation were made by linear regression, using the global solar irradiance ( $R_g$ ) and net short-waves radiation ( $R_c$ ) as independent variables. All estimates of radiation showed better adjustment for specific phenological periods compared to the entire crop growing cycle. The net radiation in the greenhouse has been estimated by the global solar irradiance measured at field conditions.

Index terms: *Phaseolus vulgaris*, solar radiation.

## INTRODUÇÃO

O balanço de radiação na superfície da terra, abrangida pela associação da vegetação natural ou de culturas agrícolas, é de grande importância na determinação das perdas de água e no acúmulo de matéria seca pelos vegetais (Stanhill et al., 1966).

<sup>1</sup> Aceito para publicação em 31 de julho de 1998.

<sup>2</sup> Meteorologista, Dr., Dep. de Meteorologia, CCEN, Universidade Federal de Alagoas, BR 104, Km 14, CEP 57072-970 Maceió, AL. E-mail: jls@ccen.ufal.br

<sup>3</sup> Físico, Dr., Dep. de Ciências Ambientais, FCA-UNESP, Caixa Postal 510, CEP 18618-000 Botucatu, SP.

<sup>4</sup> Bióloga, Dr<sup>a</sup>, Dep. de Bioestatística, IB-UNESP.

Um dos componentes mais importantes do balanço de radiação, que é caracterizado pelas condições de reflexão da superfície, é o albedo. O albedo é igual a razão entre a radiação eletromagnética refletida pela superfície e a incidente. A importância do albedo em estudos micrometeorológicos de plantas é relatada por Monteith (1973), sendo esse índice dependente da geometria do dossel vegetativo, do ângulo de elevação do Sol e das propriedades radiativas dos componentes da vegetação. O albedo de várias superfícies têm sido determinado, com destaque para os trabalhos de Monteith & Szeicz (1961, 1962), Stanhill et al. (1966), Chia (1967), Fritschen (1967), André & Viswanadham (1983), Fontana et al. (1991).

A energia radiante disponível na superfície é o saldo de radiação ( $R_n$ ), obtido pela diferença entre o saldo de radiação de ondas curtas ( $R_c$ ) e o saldo de radiação de ondas longas ( $R_l$ ). As medidas de saldo de radiação em comunidades vegetais são necessárias para caracterizar as disponibilidades térmicas e hídricas, fundamentais no entendimento das reações genótipo-ambiente, que determinarão a produção e a produtividade da vegetação. O fato dos componentes de radiação solar serem mais frequentemente medidos que o saldo de radiação induziu a procura de relações entre esses componentes, que permitem suprir a falta das medições do saldo de radiação. A forma mais comum de relacionar o saldo de radiação com a radiação solar é através do modelo de regressão linear simples (Shaw, 1956; Monteith & Szeicz, 1962; Fritschen, 1967; Davies & Buttiner, 1969; André & Viswanadham, 1983), onde a irradiância solar global ( $R_g$ ) ou o saldo de radiação de ondas curtas ( $R_c$ ) é considerado variável independente, sendo específico para cada cultura e local.

A medição da radiação em ambientes vegetativos com proteção sofre alteração de diversos fatores, sendo a principal, o sombreamento do sensor do radiômetro através das estruturas de sustentação da casa de vegetação. Outras causas de variação nas medidas de radiação no interior de casas de vegetação são a forma e inclinação do teto, tipos de laterais e reflexões internas (Edwards & Lake, 1964, 1965). O ambiente de casa de vegetação com cobertura de polietileno acarreta alterações em

diversos elementos meteorológicos, sendo seus efeitos ainda pouco conhecidos (Vanderpost et al., 1974; Critten, 1993; Farias et al., 1993).

O objetivo desse trabalho é apresentar o albedo e estimativas do saldo de radiação ( $R_n$ ) em ambientes cultivados com feijão-vagem, em condições normais e em casa de vegetação com cobertura de polietileno.

## MATERIAL E MÉTODOS

A avaliação da radiação teve início com a instalação de um experimento localizado ao lado do Departamento de Biofísica da Universidade Estadual Paulista, Campus de Rubião Júnior, Botucatu, SP, (22° 54' S; 48° 27' W; 850 m), no período entre os dias 288 e 365 do ano de 1994. O experimento constou de duas parcelas, cultivadas com a cultura do feijão-vagem rasteiro, variedade Paulista, e medindo 7 m de comprimento e 5 m de largura. Uma das parcelas localizava-se no interior de uma casa de vegetação, tipo semi-arco, orientada na direção norte-sul geográfico com cobertura de polietileno novo de 100 micra (com aditivos anti-ultravioleta e térmicos) e laterais de sombrite a 50%. A outra parcela ficou localizada no exterior da casa de vegetação em condições normais de ambiente. No centro de cada parcela instalaram-se dois piranômetros, para medições da irradiância solar global e refletida, e dois saldos radiômetros mediram os balanços entre as ondas curtas e longas nos dois ambientes. Exceto um piranômetro PSP da EPPLEY, que monitorou a irradiância solar global externa à estufa, os demais piranômetros foram construídos e calibrados conforme metodologia apresentada por Escobedo et al. (1994). Os saldos radiômetros utilizados foram idênticos aos fabricados e calibrados por Souza & Escobedo (1995). As observações referentes à cultura do feijão constaram de fenologia, seguindo uma aproximação da escala fenológica de Fernandez et al. (1982), citado por Vieira (1991). As datas da ocorrência dos eventos fenológicos em cada ambiente foram observadas quando 50% das plantas apresentavam esse evento. Os códigos fenológicos são designados pelas letras V para representar a fase vegetativa da cultura e R para referir-se à fase reprodutiva. Cada código representa um evento fenológico da seguinte maneira:  $V_0$  - data do plantio;  $V_1$  - emergência das plantas;  $V_2$  - folhas primárias completamente expandidas;  $V_3$  - primeira folha trifoliolada completamente aberta;  $V_4$  - terceira folha trifoliolada completamente aberta;  $R_5$  - aparecimento do primeiro botão floral;  $R_6$  - aparecimento da primeira flor aberta;  $R_7$  - aparecimento da primeira vagem;  $R_8$  - desenvolvimento de sementes (vagem com comprimento máximo);  $R_9$  - início da maturação (primeira vagem apresenta mudança de cor).

Os instrumentos de medição da radiação foram ligados de forma diferencial a uma "AM416 MULTIPLEXER", conectada a um "datalogger 21X", programado para fazer uma medida do sinal em milivolts a cada segundo, e armazenar médias a cada cinco minutos. Todo este sistema foi ligado a um microcomputador. No final de cada período de observação previamente definido, os milivolts armazenados eram convertidos em densidade de fluxo de radiação ( $W/m^2$ ), utilizando-se a constante de cada radiômetro. As densidades de fluxos de cada cinco minutos da irradiância solar global ( $R_g$ ) e radiação solar refletida ( $R_r$ ) foram utilizadas para calcular o albedo ( $r$ ), através da razão entre  $R_r$  e  $R_g$ . Os valores de  $r$  serviram para construir curvas diurnas no período das 7 às 17h. A análise do albedo primeiramente se deteve com cada ambiente isoladamente, levando em consideração a condição de cobertura do céu representado por seis dias selecionados. O albedo médio cumulativo foi calculado por meio de médias móveis diurnas, iniciando na emergência, dia do ano 295, até a maturação, dias do ano 356 e 358, na parcela em condições de campo e na casa de vegetação com cobertura de polietileno, respectivamente.

A estimativa do saldo de radiação ( $R_n$ ) nos dois ambientes nas fases vegetativa, reprodutiva e no ciclo da cultura foi realizada por meio da análise de regressão linear simples, tendo como variáveis independentes a irradiância solar global ( $R_g$ ) ou o saldo de radiação de ondas curtas ( $R_c$ ). Esse método estatístico foi também usado para estimar o saldo de radiação do cultivo interno à casa de vegetação ( $R_{nI}$ ) e a irradiância global interna ( $R_{gI}$ ), tendo como variável independente a irradiância solar global externa ( $R_{gE}$ ) ou o saldo de ondas curtas externo ( $R_{cE}$ ) ou o saldo de radiação externo ( $R_{nE}$ ). A inclinação (a), o intercepto (b), o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e o desvio-padrão da regressão ( $s_{y,x}$ ) serviram como critérios estatísticos na avaliação das melhores estimativas. A hipótese nula de os parâmetros a e b serem iguais a zero foi verificada através do teste t, adotando-se um nível de significância de 5%. As hipóteses alternativas adotadas foram para  $\alpha \neq 0$  e para  $\beta > 0$ . O detalhamento sobre o experimento, balanço de radiação e observações fenológicas do feijoeiro, foram relatados por Souza & Escobedo (1997).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Albedo da cultura

A distribuição diurna com médias de cinco minutos da razão  $R_r/R_g$ , na fase fenológica  $V_4$  da cultura, é mostrada na Fig. 1, em condição de céu parcialmente

nublado (a) e claro (b). O valor do albedo externo com céu parcialmente nublado é 0,16 às 7h, 0,10 ao meio-dia, e 0,14, quando calculado através do total diurno. Interno à casa de vegetação  $r$  foi 0,24 às 7h, 0,22 ao meio-dia, 0,28 às 16h30 e 0,25, quando obtido pelo total diurno. Nesta mesma fase fenológica, mas em condição de céu claro, o albedo externo ficou em 0,27 às 7h, 0,17 ao meio-dia, e 0,17 na computação da integração diurna. O  $r$  interno nestas condições foi 0,28 às 7h, 0,21 ao meio-dia, 0,28 às 17h e 0,25 na computação diurna.

O albedo diurno na fase fenológica  $R_8$  é mostrado na Fig. 2, sob condição de céu claro (a) e parcialmente nublado (b). O cultivo externo com céu claro teve um albedo de 0,36 às 7h, 0,15 ao meio-dia, 0,10 às 17h e 0,16 para o total diurno. Com o céu parcialmente nublado, observou-se um  $r$  externo de 0,36 às 7h, 0,22 ao meio-dia, 0,15 às 12h15, 0,11 às 17h e 0,16 no total diurno. Interno à casa de vegetação sob condição de céu claro, o albedo foi 0,21 às 7h, 0,22 ao meio-dia, 0,17 às 17h e 0,25 calculado através do total diurno. Em condição de céu parcialmente nublado,  $r$  interno, na fase fenológica  $R_8$ , foi 0,22 às 7h, 0,24 ao meio-dia, 0,20 às 17h e 0,25 obtido pelo total diurno.

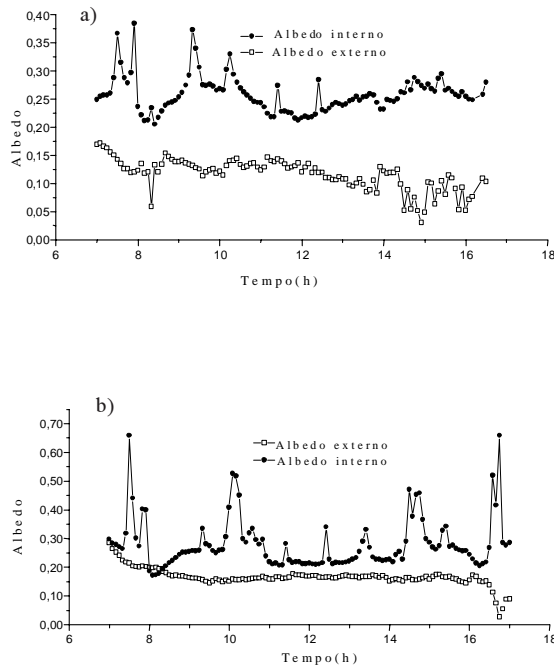
A curva do albedo diurno, nas fases fenológicas  $V_2$  (a) e  $R_9$  (b), é visto na Fig. 3. Esse índice externo em  $V_2$  com céu parcialmente nublado foi 0,15 às 7h, 0,12 ao meio-dia, e 0,13 no total diurno. Esse parâmetro externo em  $R_9$ , com céu claro, foi 0,21 às 7h, 0,11 ao meio-dia, e 0,11 quando calculado pelo total do dia. No ambiente interno e fase  $V_2$ ,  $r$  foi 0,25 às 7h, 0,25 ao meio-dia, e 0,26 para o total diurno. Na fase  $R_9$ , o albedo interno ficou em 0,35 às 7h, 0,18 ao meio-dia, e 0,22 quando obtido pelo total do diurno. O albedo interno a casa de vegetação altera-se tanto pela redução causada pela cobertura plástica, como também pela incidência de radiação nas estruturas de sustentação da casa de vegetação.

A Fig. 4 mostra o albedo médio cumulativo, desde a fase da emergência ( $V_1$ ) até a maturação ( $R_9$ ). É visível o aumento do albedo com o avanço das fases fenológicas da cultura. No ambiente externo (Fig. 4a), o albedo variou de aproximadamente 0,10 no estágio fenológico  $V_1$ , atingiu 0,16 no estágio  $R_5$  e permaneceu com 0,165 em vários dias da

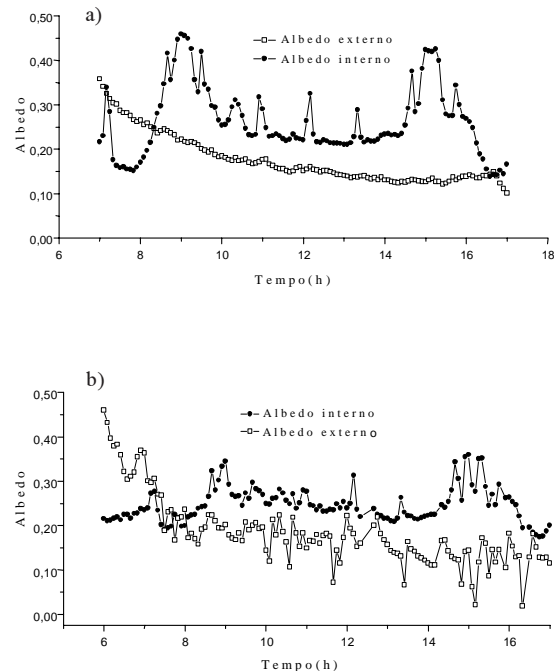
fase reprodutiva. Após o estágio fenológico  $R_9$ , a tendência do albedo médio externo foi diminuir. Praticamente, o mesmo comportamento verificado no ambiente externo se repete para o albedo interno (Fig. 4b). Na fase fenológica  $V_1$ , seu valor é de aproximadamente 0,20, seguido de máximos de 0,245, entre os dias do ano 336 e 348 (fase reprodutiva), e a partir daí tende a decrescer. De maneira geral, o albedo calculado através de totais diurnos não mostrou diferença significativa com mudança na condição de céu claro para céu parcialmente nublado. O aumento no albedo da cultura na casa de vegetação é decorrente da diminuição da irradiância solar global, devido à cobertura plástica e aos outros materiais que compõem a casa de vegetação.

#### Estimativa do saldo de radiação

A plotagem de totais diurnos do saldo de radiação sobre a irradiância solar global e saldo de ondas curtas, na parcela externa cultivada com feijão-vagem, mostrou uma relação linear nas fases fenológicas vegetativa, reprodutiva e do ciclo. Equações de regressões, desvio-padrão da regressão, coeficiente de determinação e número de observações referentes a essas condições constam da Tabela 1. O saldo de radiação mostrou-se bem estimado em todas as fases da cultura, tanto em função da irradiância solar global como através do saldo de radiação de ondas curtas, com um coeficiente de determinação variando de 0,935 para  $R_n \times R_g$  na fase vegetativa até 0,984 para  $R_n \times R_c$



**FIG. 1.** Curvas do albedo médio de cinco minutos no estágio fenológico  $V_4$  da cultura do feijão-vagem, em condição de céu parcialmente nublado (a) e claro (b) em ambiente externo e interno à casa de vegetação, correspondendo aos dias 312 e 315 do ano de 1994, respectivamente.



**FIG. 2.** Curvas do albedo médio de cinco minutos no estágio fenológico  $R_9$  da cultura do feijão-vagem, em condição de céu claro (a) e parcialmente nublado (b) em ambiente externo e interno à casa de vegetação, correspondendo aos dias 342 e 344 do ano de 1994, respectivamente.

na fase reprodutiva. O desvio-padrão da regressão variou de 0,728 a 0,816 MJ m<sup>-2</sup> para a regressão de R<sub>n</sub> sobre R<sub>g</sub>, correspondendo a 5% do valor médio (14,6 MJ m<sup>-2</sup>) do saldo de radiação do ciclo da cultura. O saldo de radiação externo ficou melhor explicado nas três fases da cultura pelo saldo de ondas curtas. Em média, o s<sub>y,x</sub> ficou 29% menor para a regressão R<sub>n</sub> x R<sub>c</sub> comparada a R<sub>n</sub> x R<sub>g</sub>.

Uma avaliação idêntica à da parcela externa foi realizada no cultivo da parcela interna à casa de vegetação (Tabela 2). Todas as estimativas do saldo de radiação interno, comparadas às estimativas externas, mostraram uma diminuição no coeficiente de determinação e um aumento relativo (7,5%) no erro-padrão referente ao R<sub>n</sub> médio (9,2 MJ m<sup>-2</sup>) do ciclo. A causa de tais diferenças é creditada em

parte ao sombreamento alternado dos sensores dos radiômetros, devido às estruturas de sustentação da casa de vegetação. O saldo de radiação interno ficou explicado pela irradiância solar global interna em 92,3%, 91% e 88,5% nas fases vegetativa, reprodutiva e ciclo, respectivamente. Essa variável ficou também melhor estimada em função do saldo de radiação de ondas curtas interno, com um R<sup>2</sup> variando de 0,904 no ciclo da cultura a 0,949 na fase vegetativa. O desvio-padrão da regressão diminuiu em média 12%, para as regressões R<sub>n</sub> x R<sub>c</sub>, ao invés de R<sub>n</sub> x R<sub>g</sub>.

Medições de elementos meteorológicos e, principalmente, de radiação em ambiente de casa de vegetação não são práticas de rotina, e envolvem dificuldades, devido à variação que sofrem esses

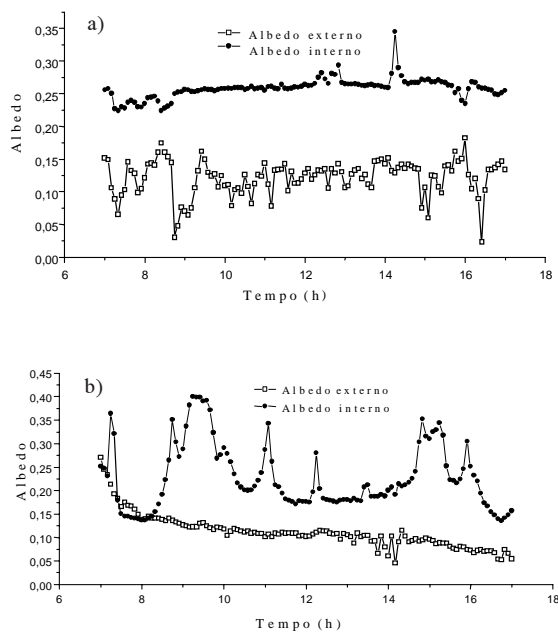


FIG. 3. Curvas do albedo médio de cinco minutos no estágio fenológico V<sub>2</sub> e R<sub>9</sub> da cultura do feijão-vagem, em condição de céu parcialmente nublado (a) e claro (b) em ambiente externo e interno à casa de vegetação, correspondendo aos dias 302 e 358 do ano de 1994, respectivamente.

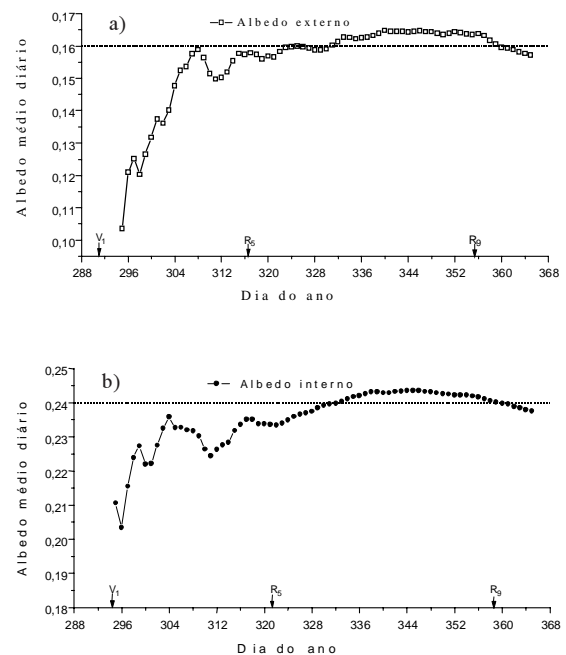


FIG. 4. Albedo médio diurno no ciclo da cultura do feijão-vagem no ambiente externo (a) e interno (b) à casa de vegetação com cobertura de polietileno.

elementos por obstrução da estrutura da casa e condensação de água, entre outros fatores. A obtenção do saldo de radiação e da irradiância solar global internos à casa de vegetação de maneira indireta em função das radiações externas  $R_gE$ ,  $R_cE$  e  $R_nE$  constam da Tabela 3. Os valores da inclinação mostram-se significativamente maiores que zero a 5%, admitindo obter  $R_nI$  e  $R_gI$  internos como função linear de  $R_nE$  e  $R_gE$  externos. Os valores do intercepto (a), que se mostraram não-significativos a 5%, permitiram obter relações

lineares entre essas variáveis, passando pela origem zero. Observando os parâmetros da Tabela 3, nota-se que a estimativa da irradiância global interna, através da irradiância global externa, mostrou em média  $R^2$  (0,980) e  $s_{y,x}$  (0,52 MJ m<sup>-2</sup>), correspondendo a 3,7% da média (13,7 MJ m<sup>-2</sup>) do período, respectivamente maior e menor em relação às demais regressões.

De maneira geral, todas as radiações internas tiveram melhor relação linear com as radiações externas quando obtidos nas fases vegetativas e

**TABELA 1.** Intercepto (a), inclinação (b), desvio-padrão da regressão ( $s_{y,x}$ ) e coeficiente de determinação ( $R^2$ ) para a regressão de totais diurnos (MJ m<sup>-2</sup>) de saldo de radiação ( $R_n$ ) sobre a irradiância solar global ( $R_g$ ) e saldo de radiação de ondas curtas ( $R_c$ ), em três fases fenológicas da cultura do feijão-vagem, na parcela externa à casa de vegetação com cobertura de polietileno, no período entre os dias 295 e 365 do ano de 1994.

Fase	Regressão	Parâmetro externo			Número de dias	
		a	b	$s_{y,x}$		$R^2$
Vegetativa	$R_n \times R_g$	3,396**	0,530**	0,731	0,935	24
	$R_n \times R_c$	2,781**	0,660**	0,546	0,964	24
Reprodutiva	$R_n \times R_g$	0,652 <sup>ns</sup>	0,630**	0,728	0,968	47
	$R_n \times R_c$	1,453**	0,710**	0,502	0,984	47
Ciclo	$R_n \times R_g$	1,718**	0,598**	0,816	0,953	71
	$R_n \times R_c$	2,046**	0,690**	0,578	0,976	71

<sup>ns</sup> e \*\* Não-significativo e significativo a 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste t.

**TABELA 2.** Intercepto (a), inclinação (b), desvio-padrão da regressão ( $s_{y,x}$ ) e coeficiente de determinação ( $R^2$ ), na regressão de totais diurnos (MJ m<sup>-2</sup>) de saldo de radiação ( $R_n$ ) sobre a irradiância solar global ( $R_g$ ) e saldo de radiação de ondas curtas ( $R_c$ ), em fases fenológicas do feijão-vagem, na parcela interna à casa de vegetação, no período entre os dias 295 e 365 do ano de 1994.

Fase	Regressão	Parâmetro interno			Número de dias	
		a	b	$s_{y,x}$		$R^2$
Vegetativa	$R_n \times R_g$	0,307 <sup>ns</sup>	0,690**	0,666	0,923	24
	$R_n \times R_c$	0,022 <sup>ns</sup>	0,932**	0,554	0,949	24
Reprodutiva	$R_n \times R_g$	1,442**	0,551**	0,654	0,910	47
	$R_n \times R_c$	1,168**	0,749**	0,588	0,927	47
Ciclo	$R_n \times R_g$	1,383**	0,571**	0,756	0,885	71
	$R_n \times R_c$	1,102**	0,776**	0,688	0,904	71

<sup>ns</sup> e \*\* Não-significativo e significativo a 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste t.

reprodutivas do que para o ciclo como um todo. Isto refletiu-se pelo aumento do coeficiente de determinação, diminuição do desvio-padrão da regressão e do número de observações. O saldo de radiação interno na fase vegetativa ficou melhor explicado através do saldo de ondas curtas externo com coeficiente de determinação igual a 0,924 e desvio-padrão igual a 0,670 (equivalente a 7,3% do saldo de radiação médio interno), enquanto que, na fase reprodutiva e no ciclo da cultura  $R_nI$ , mostrou melhor relação com a irradiância solar global externa. Assim, tendo em vista a maior dificuldade na obtenção do saldo de radiação do que a irradiância solar global, considera-se satisfatória a estimativa do saldo de radiação sobre a cultura do feijão-vagem interno à casa de vegetação, como função linear da irradiância solar global externa com coeficiente de determinação acima de 0,918 e desvio-padrão da regressão de 0,712 MJ m<sup>-2</sup>, nas fases vegetativa e reprodutiva.

Em determinadas aplicações agrícolas, como o cultivo irrigado, onde há necessidade de manter a

cultura abastecida plenamente de água, é importante conhecer o suprimento energético horário. As Tabelas 4, 5 e 6 mostram parâmetros de regressões lineares de totais horários nos ambientes externo, interno, e interno versus externo. Na parcela externa (Tabela 4), o saldo de totais horários de radiação pode ser estimado através de  $R_g$  ou por  $R_c$  com coeficiente de determinação acima de 0,976. O saldo de radiação de ondas curtas acrescentou uma pequena melhora na estimativa do saldo de radiação, visto pelo aumento de  $R^2$  e pela diminuição de  $s_{y,x}$ . Os valores dos erros-padrões da regressão  $R_n \times R_g$ , para totais horários, foram de 0,101, 0,128 e 0,121 MJ m<sup>-2</sup> nas fases fenológicas reprodutiva, vegetativa e ciclo da cultura. O intercepto (a) variou de -0,077, na fase vegetativa, a -0,252 na fase reprodutiva, se assemelhando aos valores encontrados por Kalma (1972), onde a variação foi de -0,054 a -0,2988, e erro-padrão entre 0,122 e 0,187 MJ m<sup>-2</sup>.

Estimativas de totais horários de saldo de radiação interno à casa de vegetação em função de

**TABELA 3.** Intercepto (a), inclinação (b), desvio-padrão da regressão ( $s_{y,x}$ ) e coeficiente de determinação ( $R^2$ ), na regressão de totais diurnos (MJ m<sup>-2</sup>) da irradiância solar global interna ( $R_gI$ ) e saldo de radiação interno ( $R_nI$ ) sobre a irradiância solar global externa ( $R_gE$ ), saldo de radiação ( $R_nE$ ) e saldo de radiação de ondas curtas externo ( $R_cE$ ), em fases fenológicas da cultura do feijão-vagem, no período entre os dias 295 e 365 do ano de 1994.

Fase	Regressão	Parâmetro				Número de dias
		a	b	$s_{y,x}$	$R^2$	
Vegetativa	$R_nI \times R_gE$	0,385 <sup>ns</sup>	0,440 <sup>**</sup>	0,696	0,918	24
	$R_nI \times R_cE$	-0,020 <sup>ns</sup>	0,547 <sup>**</sup>	0,670	0,924	24
	$R_nI \times R_nE$	-1,92 <sup>**</sup>	0,797 <sup>**</sup>	0,794	0,891	24
	$R_gI \times R_gE$	0,183 <sup>ns</sup>	0,633 <sup>**</sup>	0,459	0,982	24
Reprodutiva	$R_nI \times R_gE$	1,716 <sup>**</sup>	0,333 <sup>**</sup>	0,728	0,968	47
	$R_nI \times R_cE$	2,202 <sup>**</sup>	0,370 <sup>**</sup>	0,525	0,943	47
	$R_nI \times R_nE$	1,538 <sup>**</sup>	0,516 <sup>**</sup>	0,562	0,933	47
	$R_gI \times R_gE$	0,883 <sup>**</sup>	0,587 <sup>**</sup>	0,551	0,978	47
Ciclo	$R_nI \times R_gE$	1,758 <sup>**</sup>	0,340 <sup>**</sup>	0,751	0,887	71
	$R_nI \times R_cE$	2,069 <sup>**</sup>	0,390 <sup>**</sup>	0,777	0,880	71
	$R_nI \times R_nE$	1,023 <sup>**</sup>	0,560 <sup>**</sup>	0,789	0,876	71
	$R_gI \times R_gE$	0,811 <sup>**</sup>	0,593 <sup>**</sup>	0,542	0,978	71

<sup>ns</sup> e <sup>\*\*</sup> Não-significativo e significativo a 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste t.

$R_g$  e  $R_c$ , utilizando regressões lineares simples, constam da Tabela 5. Exceto o valor do parâmetro  $a$  de  $R_n \times R_c$ , na fase reprodutiva, os demais interceptos não diferiram (a 5% de probabilidade) de zero. Isto equivale a admitir que o valor  $a$  igual a zero é o saldo de radiação interno quando a radiação solar no interior da casa de vegetação é nula. O saldo de totais horários de radiação ficou explicado como função linear de totais horários da irradiância global

interna e saldo de ondas curtas, com um coeficiente de determinação variando de 0,726 a 0,922, e desvios-padrões das regressões, entre 0,181 e 0,256 MJ m<sup>-2</sup>.

As regressões de totais horários internos de saldo de radiação e da irradiância solar global versus totais horários das irradiâncias solar globais, saldo de radiação e saldo de radiação de ondas curtas são mostradas na Tabela 6. Os totais horários

**TABELA 4.** Intercepto ( $a$ ), inclinação ( $b$ ), desvio-padrão da regressão ( $s_{y,x}$ ) e coeficiente de determinação ( $R^2$ ) na regressão de totais horários (MJ m<sup>-2</sup>) de saldo de radiação ( $R_n$ ) sobre a irradiância solar global ( $R_g$ ) e saldo de radiação de ondas curtas ( $R_c$ ) em três fases fenológicas da cultura do feijão-vagem, na parcela externa a casa de vegetação, com cobertura de polietileno, referente aos dias 296, 312, 315, 326, 342, e 358 do ano de 1994.

Fase	Regressão	Parâmetro externo				Número de dias
		a	b	$s_{y,x}$	$R^2$	
Vegetativa	$R_n \times R_g$	-0,077*	0,710**	0,128	0,976	36
	$R_n \times R_c$	-0,019 <sup>ns</sup>	0,817**	0,091	0,988	36
Reprodutiva	$R_n \times R_g$	-0,252**	0,767**	0,101	0,988	36
	$R_n \times R_c$	-0,197**	0,867**	0,098	0,988	36
Ciclo	$R_n \times R_g$	-0,152**	0,740**	0,121	0,980	72
	$R_n \times R_c$	-0,089**	0,845**	0,105	0,986	72

<sup>ns</sup>, \* e \*\* Não-significativo e significativo a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste t.

**TABELA 5.** Intercepto ( $a$ ), inclinação ( $b$ ), desvio-padrão da regressão ( $s_{y,x}$ ) e coeficiente de determinação ( $R^2$ ) na regressão de totais horários (MJ m<sup>-2</sup>) de saldo de radiação ( $R_n$ ) sobre a irradiância solar global ( $R_g$ ) e saldo de radiação de ondas curtas ( $R_c$ ), em três fases fenológicas da cultura do feijão-vagem, na parcela interna à casa de vegetação, com cobertura de polietileno, referente aos dias 296, 312, 315, 326, 342 e 358 do ano de 1994.

Fase	Regressão	Parâmetro interno				Número de dias
		a	b	$s_{y,x}$	$R^2$	
Vegetativa	$R_n \times R_g$	-0,051 <sup>ns</sup>	0,767**	0,181	0,922	36
	$R_n \times R_c$	-0,031 <sup>ns</sup>	0,998**	0,198	0,908	36
Reprodutiva	$R_n \times R_g$	0,117 <sup>ns</sup>	0,555**	0,228	0,783	36
	$R_n \times R_c$	0,179*	0,677**	0,256	0,726	36
Ciclo	$R_n \times R_g$	0,032 <sup>ns</sup>	0,655**	0,230	0,835	72
	$R_n \times R_c$	0,076 <sup>ns</sup>	0,824**	0,255	0,797	72

<sup>ns</sup>, \* e \*\* Não-significativo e significativo a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste t.



de saldo de radiação interno, nas três fases da cultura, foram melhor explicados pelos totais horários das radiações externas  $R_gE$ ,  $R_cE$  e  $R_nE$ , que através de medidas de  $R_g$  e  $R_c$ . O coeficiente de determinação ficou acima de 0,912, nas fases vegetativa e reprodutiva, para a regressão de  $R_nI$  versus  $R_gE$  ao passo que em todo o ciclo da cultura esse valor foi 0,856. A estimativa de  $R_nI$ , em função de  $R_nE$ , apresentou-se maior que  $R_nI$  versus  $R_gE$ , somente na fase vegetativa ( $R^2 = 0,931$ ). O saldo de radiação de ondas curtas também superou ( $R^2 = 0,978$ ) as outras variáveis de radiação que estimaram  $R_nI$ , na fase vegetativa. A irradiância solar global interna em função da irradiância solar global externa ficou explicado nas três fases fenológicas da cultura com coeficiente de determinação acima de 0,929. O coeficiente angular (b), referente à reta de regressão de totais horários, no ambiente externo, teve uma pequena variação positiva (em torno de 7%). Nas estimativas internas e internas versus externas, a diminuição de

$R^2$  com o avanço da fase fenológica foi em torno de 30%.

Uma relação entre médias de ½ hora ( $W m^{-2}$ ) do saldo de radiação nos ambientes externo, interno e interno versus externo em função de  $R_g$ ,  $R_c$ ,  $R_gE$  e  $R_nE$ , consta nas Tabelas 7, 8 e 9, respectivamente. Na parcela externa (Tabela 7)  $R_n$  poderá ser estimado tanto por  $R_g$  como por  $R_c$ , com coeficiente de determinação acima de 0,978. A inclinação (b) aumentou com o avanço da fase enquanto que o intercepto (a) diminuiu. A indicação de que a corresponde ao valor de  $R_n$  quando  $R_g$  é nula, leva a admitir que, nessa condição há uma maior emissão de ondas longas na fase reprodutiva. O saldo de ondas curtas explicou melhor o saldo de radiação na fase reprodutiva do que na fase vegetativa, sendo coerente com uma maior reflexão da cultura nessa fase. Na fase vegetativa,  $R_g$  e  $R_c$  tiveram um coeficiente de determinação igual, mas  $R_n \times R_c$  apresentou um desvio-padrão da regressão menor. O desvio-padrão da regressão médio de  $R_n$  versus  $R_g$ , em relação à média (402 e 478  $W m^{-2}$ ) diurna, foi de 7 e 8%, nas

**TABELA 6.** Intercepto (a), inclinação (b), desvio-padrão da regressão ( $s_{y,x}$ ) e coeficiente de determinação ( $R^2$ ), na regressão de totais horários ( $MJ m^{-2}$ ) da irradiância solar global interna ( $R_nI$ ) e saldo de radiação interno ( $R_nI$ ) sobre a irradiância solar global externa ( $R_gE$ ), saldo de radiação externa ( $R_nE$ ) e saldo de radiação de ondas curtas externo ( $R_cE$ ), em três fases da cultura do feijão-vagem, referentes aos dias 296, 312, 315, 326, 342 e 358 do ano de 1994.

Fase	Regressão	Parâmetro				Número de dias
		a	b	$s_{y,x}$	$R^2$	
Vegetativa	$R_nI \times R_gE$	-0,149*	0,542**	0,190	0,914	36
	$R_nI \times R_cE$	-0,051 <sup>ns</sup>	0,610**	0,093	0,978	36
	$R_nI \times R_nE$	-0,086 <sup>ns</sup>	0,758**	0,171	0,931	36
	$R_gI \times R_gE$	-0,094 <sup>ns</sup>	0,690**	0,189	0,947	36
Reprodutiva	$R_nI \times R_gE$	-0,023 <sup>ns</sup>	0,393**	0,146	0,912	36
	$R_nI \times R_cE$	0,017 <sup>ns</sup>	0,439**	0,163	0,889	36
	$R_nI \times R_nE$	0,119*	0,505**	0,158	0,895	36
	$R_gI \times R_gE$	-0,061 <sup>ns</sup>	0,632**	0,208	0,929	36
Ciclo	$R_nI \times R_gE$	-0,055 <sup>ns</sup>	0,447**	0,216	0,856	72
	$R_nI \times R_cE$	-0,007 <sup>ns</sup>	0,501**	0,226	0,841	72
	$R_nI \times R_nE$	0,0457 <sup>ns</sup>	0,601**	0,216	0,856	72
	$R_gI \times R_gE$	-0,062 <sup>ns</sup>	0,652**	0,205	0,933	72

<sup>ns</sup>, \* e \*\* Não-significativo e significativo a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste t.

fases vegetativa e reprodutiva. A regressão  $R_n$  versus  $R_c$  teve desvio padrão da regressão correspondente a 6% em relação à média diurna.

As regressões de  $R_n$  sobre  $R_g$  e  $R_c$  referentes ao interior da casa de vegetação, para médias de ½ hora em  $W m^{-2}$  (Tabela 8) apresentaram coeficientes de determinações variando de 0,702 ( $R_n I \times R_c I$ ), na fase reprodutiva, a 0,916 ( $R_n I \times R_g I$ ), na fase vegetativa. O intercepto dá uma indicação de uma maior emissão da atmosfera do ambiente interno que

a superfície quando a radiação solar se anula. Esse aspecto se intensifica com o avanço da fase fenológica, visto que o parâmetro b diminuiu enquanto que a aumentou. O erro-padrão da regressão no ambiente interno variou em torno de  $50 W m^{-2}$  na fase vegetativa até  $79 W m^{-2}$ , na fase reprodutiva.

A estimativa de radiações internas versus externas para médias de meia hora consta da Tabela 9. A melhor estimativa do saldo de radiação

**TABELA 7.** Intercepto (a), inclinação (b), desvio-padrão da regressão ( $s_{y,x}$ ) e coeficiente de determinação ( $R^2$ ), na regressão de média de meia hora ( $W m^{-2}$ ) de saldo de radiação ( $R_n$ ) sobre a irradiância solar global ( $R_g$ ) e saldo de radiação de ondas curtas ( $R_c$ ), em três fases fenológicas da cultura do feijão-vagem, na parcela externa à casa de vegetação, com cobertura de polietileno, referentes aos dias 296, 312, 315, 326, 342 e 358 do ano de 1994.

Fase	Regressão	Parâmetro externo				Número de dias
		a	b	$s_{y,x}$	$R^2$	
Vegetativa	$R_n \times R_g$	-12,39**	0,698**	27,58	0,986	66
	$R_n \times R_c$	-13,87*	0,826**	26,14	0,986	66
Reprodutiva	$R_n \times R_g$	-80,35**	0,776**	37,62	0,978	72
	$R_n \times R_c$	-47,18**	0,858**	23,41	0,992	72
Ciclo	$R_n \times R_g$	-43,19**	0,735**	36,35	0,978	138
	$R_n \times R_c$	-27,09**	0,837**	26,12	0,988	138

\* e \*\* Significativo a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste t.

**TABELA 8.** Intercepto (a), inclinação (b), desvio-padrão da regressão ( $s_{y,x}$ ) e coeficiente de determinação ( $R^2$ ), na regressão de média de meia hora ( $W m^{-2}$ ) de saldo de radiação ( $R_n$ ), sobre a irradiância solar global ( $R_g$ ) e saldo de radiação de ondas curtas ( $R_c$ ), em três fases fenológicas da cultura do feijão-vagem, na parcela interna à casa de vegetação, com cobertura de polietileno, referentes aos dias 296, 312, 315, 326, 342 e 358 do ano de 1994.

Fase	Regressão	Parâmetro interno				Número de dias
		a	b	$s_{y,x}$	$R^2$	
Vegetativa	$R_n \times R_g$	-2,42 <sup>ns</sup>	0,726**	49,64	0,916	66
	$R_n \times R_c$	6,18 <sup>ns</sup>	0,925**	50,57	0,914	66
Reprodutiva	$R_n \times R_g$	34,79*	0,561**	70,63	0,757	72
	$R_n \times R_c$	54,98**	0,681**	78,87	0,702	72
Ciclo	$R_n \times R_g$	16,88 <sup>ns</sup>	0,637**	65,38	0,826	138
	$R_n \times R_c$	31,55**	0,795**	70,80	0,797	138

<sup>ns</sup>, \* e \*\* Não-significativo e significativo a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste t.

**TABELA 9.** Intercepto (a), inclinação (b), desvio-padrão da regressão ( $s_{y,x}$ ) e coeficiente de determinação ( $R^2$ ), na regressão de média de meia hora ( $W m^{-2}$ ) da irradiância solar radiação global interna ( $R_{gI}$ ) e saldo de radiação interno ( $R_{nI}$ ), sobre a irradiância solar global externa ( $R_{gE}$ ), saldo de radiação externo ( $R_{nE}$ ) e saldo de radiação de ondas curtas externo ( $R_{cE}$ ) em três fases fenológicas da cultura do feijão-vagem, referentes aos dias 296, 312, 315, 326, 342 e 358 do ano de 1994.

Fase	Regressão	Parâmetros				Número de dias
		a	b	$s_{y,x}$	$R^2$	
Vegetativa	$R_{nI} \times R_{gE}$	-29,172*	0,510**	49,69	0,910	66
	$R_{nI} \times R_{cE}$	7,26 <sup>ns</sup>	0,530**	91,50	0,716	66
	$R_{nI} \times R_{nE}$	-13,09 <sup>ns</sup>	0,720**	48,66	0,916	66
	$R_{gI} \times R_{gE}$	-12,639 <sup>ns</sup>	0,669**	64,062	0,922	66
Reprodutiva	$R_{nI} \times R_{gE}$	-10,99 <sup>ns</sup>	0,404**	48,84	0,882	72
	$R_{nI} \times R_{cE}$	10,11 <sup>ns</sup>	0,426**	74,01	0,731	72
	$R_{nI} \times R_{nE}$	38,146**	0,509**	49,24	0,872	72
	$R_{gI} \times R_{gE}$	-34,727 <sup>ns</sup>	0,637**	81,023	0,863	72
Ciclo	$R_{nI} \times R_{gE}$	-11,85 <sup>ns</sup>	0,437**	56,60	0,863	138
	$R_{nI} \times R_{cE}$	12,51 <sup>ns</sup>	0,473**	87,09	0,702	138
	$R_{nI} \times R_{nE}$	17,10*	0,571**	54,95	0,863	138
	$R_{gI} \times R_{gE}$	-16,263 <sup>ns</sup>	0,640**	75,81	0,885	138

<sup>ns</sup>, \* e \*\* Não-significativo e significativo a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste t.

interno à casa de vegetação foi em função da irradiância solar global obtida no exterior, com um coeficiente de determinação 0,910, na fase vegetativa, e 0,882, na fase reprodutiva. O saldo de radiação externo explicou 91,6% do seu valor interno, na fase vegetativa, e 87,2%, na fase reprodutiva. A irradiância solar global externa explicou a irradiância solar global interna em 96,2, 86,3 e 88,5%, nas fases vegetativa, reprodutiva e ciclo da cultura, respectivamente.

### CONCLUSÕES

1. O albedo em cultivo de feijão-vagem, sob condições normais de ambiente e em casa de vegetação com cobertura de polietileno, varia com a elevação solar, o ambiente e as fases fenológicas da cultura.

2. A variação de nebulosidade praticamente não influi sobre o albedo em totais diurnos.

3. Todas as estimativas de radiação apresentam um maior coeficiente de determinação nas fases fenológicas que nas do ciclo como um todo.

4. O saldo de radiação na casa de vegetação fica bem estimado pela irradiância solar global medida no ambiente externo.

### REFERÊNCIAS

- ANDRÉ, R.G.B.; VISWANADHAM, Y. Radiation balance of soybeans grown in Brazil. **Agricultural Meteorology**, v.30, p.157-173, 1983.
- CHIA, L.-S. Albedo of natural surfaces in Barbados. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v.93, p.116-120, 1967.
- CRITTEN, J.L. A review of the light transmission into greenhouse crops. **Acta Horticulturae**, v.328, p.9-31, 1993.
- DAVIES, J.A.; BUTTIMOR, P.H. Reflection coefficients, heating coefficients and net radiation at Simcoe, Southern Ontario. **Agricultural Meteorology**, v.6, p.373-386, 1969.
- EDWARDS, R.I.; LAKE, J.V. Transmission of solar radiation in a large-span east-west glasshouse glazed

- with diffusing glass. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.9, p.245-249, 1964.
- EDWARDS, R.I.; LAKE, J.V. Transmission of solar radiation in a small east-west glasshouse. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.10, p.197-201, 1965.
- ESCOBEDO, J.F.; RICIÉRI, R.P.; SOUZA, J.L. de. Termopilhas de filmes finos por evaporação de metais. I. Metodologia. In: CONGRESSO IBÉRICO DE ENERGIA SOLAR, 7., 1994, Vigo. **Anais**. Vigo: Asociación Española de Energía Solar/International Solar Energy Society, 1994. v.1, p.3-8.
- FARIAS, J.R.B.; BERGAMASCHI, H.; MARTINS, S.R.; BERLATO, M.A. Efeito da cobertura plástica sobre a radiação solar. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.1, p.31-36, 1993.
- FONTANA, D.C.; BERLATO, M.A.; BERGAMASCHI, H. Balanço de radiação da soja em região subtropical do Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.26, n.3, p.411-418, mar. 1991.
- FRITSCHEN, L.J. Net and solar radiation relations over irrigated field. **Agricultural Meteorology**, v.4, p.55-62, 1967.
- KALMA, J.D. The radiation balance of tropical pasture. II. Net all-wave radiation. **Agricultural Meteorology**, v.10, p.261-275, 1972.
- MONTEITH, J.L. **Principles of environmental physics**. London: Edward Arnold, 1973. 241p.
- MONTEITH, J.L.; SZEICZ, G. The radiation balance of bare soil and vegetation. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v.7, p.159-170, 1961.
- MONTEITH, J.L.; SZEICZ, G. Radiative temperature in the heat balance of natural surface. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v.88, p.496-507, 1962.
- SHAW, R.H. Comparison of solar radiation and net radiation. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v.37, p.205-206, 1956.
- SOUZA, J.L. de; ESCOBEDO, J.F. Balanço de radiação em cultivos de feijão-vagem com e sem cobertura de polietileno. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.32, n.1, p.1-15, jan. 1997.
- SOUZA, J.L. de; ESCOBEDO, J.F. Construção de um saldo radiômetro com termopilha de filme fino e avaliação de sua performance. **Revista Brasileira de Meteorologia**, Rio de Janeiro, v.10, n.1/2, p.29-36, 1995.
- STANHILL, G.; HOFSTEDE, G.J.; KALMA, J.D. Radiation balance of natural and agricultural vegetation. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v.92, p.128-140, 1966.
- VANDERPOST, C.J.; VAN-SHIE, J.J.; GRAAF, R. Basic problems of water relationship: energy balance and water supply in glasshouses of the West-Netherlands. **Acta Horticulturae**, v.35, p.13-21, 1974.
- VIEIRA, C. Influência das épocas de plantio sobre as etapas de desenvolvimento do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.). **Revista Ceres**, v.38, p.439-443, 1991.