

## PARAMETRIZAÇÃO DE EQUAÇÕES CLÁSSICAS DE ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO ATMOSFÉRICA DE ONDAS LONGAS NO INTERIOR DE UMA ESTUFA DE POLIETILENO PARA BOTUCATU-SP

L. C. Lenz<sup>1</sup>, E. Dal Pai<sup>2</sup>, A. Dal Pai<sup>3</sup>, J. F. Escobedo<sup>4</sup>

<sup>1, 2, 3, 4</sup>Depto. Eng Rural, FCA/UNESP, Botucatu-SP Fone: +55(14) 3880-7574, lclenz@fca.unesp.br

*Recibido 16/09/15, aceptado 15/10/15*

**RESUMO:** Objetivou-se neste trabalho a modelagem da radiação de ondas longas atmosféricas no interior de uma estufa agrícola de polietileno. Estes modelos (modelos clássicos) estimam a radiação solar de ondas longas (LW) em função da temperatura do ar  $T_a$  e pressão atual de vapor  $e_a$ , e só tem validade para dias de céu completamente limpo (sem nuvens). Foram feitas medidas das radiações de ondas longas e ondas curtas no interior de uma estufa plástica de polietileno (100 micra) no intervalo de um ano. Com estes dados os 13 modelos tiveram seus parâmetros originais ajustados (valores de erros residuais minimizados) para o interior da estufa. Dos 13 modelos ajustados, oito apresentaram um elevado coeficiente de correlação (valores de  $r^2$  maiores que 0,9). Dois modelos apresentaram desempenho inferior ao primeiro grupo, com valores de  $r^2$  próximos a 0,7; e em três modelos o ajuste dos coeficientes não foi viável.

**Palavras-chave:** Modelagem, Cultivo protegido, Radiação de ondas longas atmosférica.

### INTRODUÇÃO

A radiação de ondas longas atmosféricas (no inglês downward long-wave LW↓) é a energia irradiada pela atmosfera e seus constituintes e tem sentido descendente. Tem esse nome, pois sua irradiância está em uma faixa do espectro distante da faixa do espectro da luz solar (ondas curtas). Esta radiação é originada do aquecimento da atmosfera. A determinação de sua intensidade, sua sazonalidade e sua modelagem são importantes para estudos nas áreas de: Meteorologia, Engenharia Civil, Arquitetura e Ciências Agrárias. Tem ganhado importância atualmente na área Energética, pois o conhecimento de sua magnitude permite a racionalização do uso da energia.

As estufas de polietileno levam à obtenção de produtos de alta qualidade e podem alcançar aumento de produtividade em torno de 30% a 50% maior em relação ao ambiente externo, como mostram estudos com pepino, pimentão, feijão e tomate (Galvani et al., 2000; Cunha et al., 2003; Souza & Escobedo, 1997; Heldwein et al., 2010; Carvalho et al., 2005). No Brasil, o uso de estufas de polietileno apresenta diversas funções considerando a extensão e localização geográfica. Nas regiões Sul e Sudeste, por exemplo, a estufa de polietileno atua como regulador térmico, diminuindo o efeito danoso causadas em algumas culturas por baixas temperaturas e geadas. Em regiões onde as temperaturas são elevadas, como na região do Nordeste e Centro-Oeste as estufas de polietileno proporcionam alterações microclimáticas por meio de variações das radiações solares global, difusa, fotossinteticamente ativa (PAR), temperatura, umidade e balanço de energia, entre outras. Simultaneamente, a estufa de polietileno minimiza efeitos adversos dos ventos fortes e chuvas intensas e de granizos, que normalmente provocam danos às plantas, não só fisiológicos como mecânicos, além de diminuir a incidência de pragas (Khoshnevisan et al., 2013).

<sup>1</sup>. Eng. Agrônomo Mestrando em Energia na agricultura, Depto. Eng. Rural, FCA/UNESP, Botucatu-SP, Bolsista do CNPq

<sup>2</sup>. Eng. Agrônomo pós-doutorando em Energia na agricultura, Depto. Eng. Rural, FCA/UNESP, Botucatu-SP

<sup>3</sup>. Físico, Professor Doutor, Depto. de Bioprocessos e Biotecnologia, FCA/UNESP, Botucatu-SP

<sup>4</sup>. Físico, Professor, Depto. Eng. Rural, FCA/UNESP, Botucatu-SP

A relativa complexidade na medição de  $LW\downarrow$ , é devido à sua natureza térmica, onde sua medida é afetada pela temperatura do próprio aparelho de medição, fato que obriga que haja posteriores correções da medida (Blonquist Jr. et al., 2009). Devido a este fato, há escassez de estações que meçam rotineiramente essa radiação. No Brasil a medida da radiação solar global (radiação de ondas curtas) é rotineira, porém dados disponíveis de ondas longas são raros. Esta escassez de dados ainda resulta em poucos trabalhos de pesquisa publicados com a  $LW\downarrow$  no Brasil.

Devido à indisponibilidade de dados, a maioria dos trabalhos é na área de modelagem, objetivando gerar uma equação de estimativa da  $LW\downarrow$  na falta de sua medida. A maioria dos modelos propostos que são usados até hoje são modelos que usam a temperatura do ar e a pressão de vapor d'água como entrada de dados. Os modelos de estimativa da  $LW\downarrow$  que utilizam apenas temperatura do ar e pressão de vapor d'água são comumente chamados de "Modelos Clássicos". Tais modelos foram os primeiros propostos (Ångström propôs seu primeiro modelo de ondas longas atmosféricas em função da temperatura do ar e umidade relativa em 1918), porém modelos propostos atualmente em função de temperatura e umidade freqüentemente também recebem esta denominação. O objetivo deste trabalho foi desenvolver modelos de previsão da irradiância  $ILW\downarrow$  em Botucatu com base nos modelos clássicos em função de medidas de temperatura e umidade relativa para o interior de uma estufa de polietileno.

## MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado na Estação de Radiometria Solar de Botucatu-SP, Departamento de Recursos Naturais da Faculdade de Ciências Agrárias de Botucatu – Campus Lageado, da UNESP no período de 01/03/2008 a 28/03/2009.

Botucatu ( $22^{\circ}53'09''S$ ;  $48^{\circ}26'42''W$  e altitude média 786 m) é um município brasileiro localizado na região centro-oeste do Estado de São Paulo (Figura 1), possui área total de 1.482,642 km<sup>2</sup> e população estimada em 2013 de aproximada de 137.899 mil habitantes (IBGE, 2014). O município possui elevado gradiente de altitude, entre 400 a 500 m na região mais baixa (depressão periférica) e entre 700 a 900 na região serrana (Planalto Ocidental). Esta diferença provoca variações na temperatura do ar no município. Distante 221 km do oceano Atlântico e 235 km da Capital São Paulo, com bioma cerrado e de mata atlântica, Botucatu apresenta clima temperado quente (mesotérmico), verão quente e úmido com elevada precipitação e inverno seco (Escobedo et al., 2011).

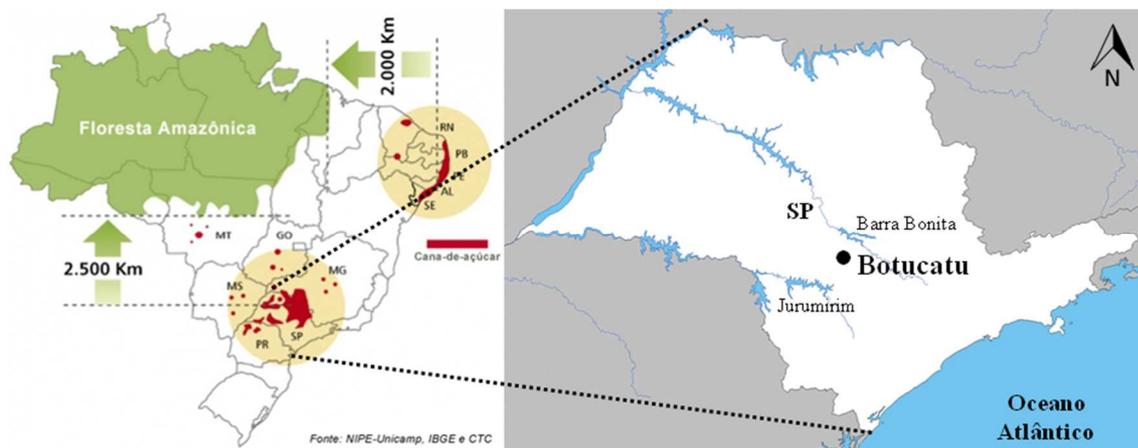


Figura 1: Resumen de las temperaturas interiores para todos los esquemas con aislación de muros

A Figura 2 (a, b) mostra as séries climáticas da temperatura do ar, umidade relativa do ar e precipitação acumulada, do período de 1971 a 2009 em Botucatu. A evolução anual mostra que os níveis de temperatura e umidade relativa são maiores quando o sol declina mais próximo da latitude local e menor quando declina mais distante da latitude local. O mês mais quente é fevereiro ( $23,216\pm 1,20^{\circ}C$ ), o mais frio julho ( $17,16\pm 1,33^{\circ}C$ ) e a temperatura do ar média anual de  $20,46\pm 2,21^{\circ}C$  (Figura 2a). A umidade relativa do ar varia de  $62,61\pm 8,88\%$  (agosto) a  $76,26\pm 8,24\%$  (fevereiro), com média anual de  $69,93\pm 4,44\%$  (Figura 2a). A precipitação média anual acumulada é de

1.494,10 mm, com chuvas mensais entre  $40,12 \pm 41,76$  mm (junho) e  $270,49 \pm 110,36$  mm (janeiro) (Figura 2b). O período mais chuvoso ocorre de outubro a março (primavera-verão) e o menos chuvoso entre abril e setembro. No período chuvoso, a precipitação é causada pela Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). No período seco, a precipitação é do tipo frontal originada do encontro das massas de ar frias e secas vindas da região sul com as massas quentes e úmidas, da região sudeste.

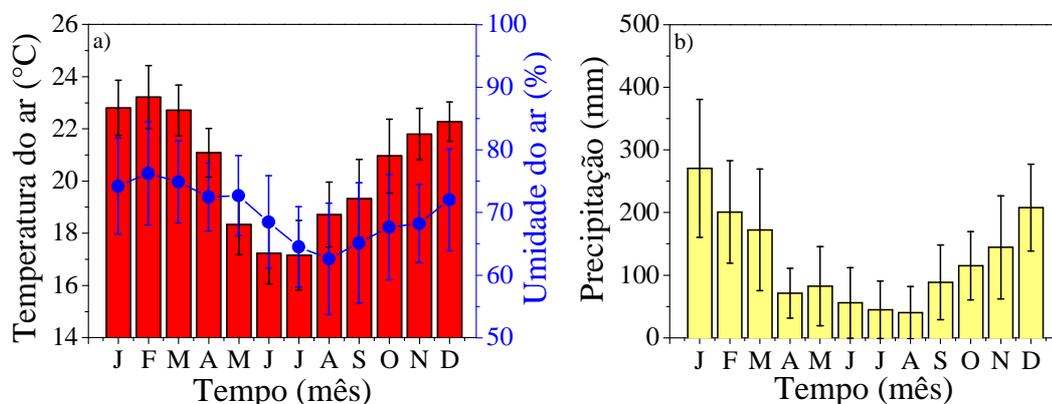


Figura 2. Séries climáticas de a) temperatura e umidade b) precipitação no período de 1971 a 2009.

A Figura 3 mostra uma fotografia da estufa utilizada no trabalho. Área de 168 m<sup>2</sup>, tipo túnel alto, com cobertura de polietileno (100 µm). Suas dimensões: 24 m de comprimento, 7 m de largura, 2 m de pé direito e 1,7 m de altura da concavidade.



Figura 3 - Estufa vista de fora; b) Saldoradiômetro CNR1 Net Radiometer.

Para a medida do saldo de radiação foi utilizado um saldoradiômetro modelo CNR1 Net Radiometer da marca Campbell Scientific. Este aparelho (Figura 4) tem a capacidade de medir as quatro componentes ao mesmo tempo: tem dois sensores capazes de medir a radiação no espectro de ondas curtas, um medindo a radiação global (voltado para cima) e outro medindo a radiação refletida (voltado para baixo); e dois sensores sensíveis no espectro de ondas longas, um medindo a radiação de onda longa atmosférica (voltado para cima) e outro medindo a radiação de onda longa terrestre (voltado para baixo). O saldoradiômetro foi calibrado, tendo sua medida comparada a outro piranômetro referencial. A calibração foi aferida antes e no final do experimento.

Durante o experimento o equipamento foi instalado na região central da estufa para evitar possíveis interferências espaciais e multireflexões. Para o acompanhamento dos elementos meteorológicos temperatura e umidade relativa do ar foi utilizado um sensor tipo HMP45C da marca Vaisala. Na aquisição dos dados foi utilizado um datalogger da marca Campbell CR21X, operando na frequência de 0,2 Hz e armazenando médias de 5 minutos ou 300 segundos. Todos os dados passaram por um

controle de qualidade para a eliminação de valores incorretos decorrentes de quedas de energia, manutenção e calibração.



Figura 4 - Saldoradiômetro CNRI Net Radiometer.

A irradiância  $I_{LW\downarrow}$  pode ser estimada por modelos empíricos, que de acordo com Brunt (1932), são formulações que se ajustam aos dados, sem que tenha havido uma justificativa teórica precisa para sua utilização. Desde o trabalho de Ångström (1918), surgiram muitas destas parametrizações, principalmente envolvendo a  $I_{LW\downarrow}$  com a temperatura e a umidade do ar (modelos clássicos), medidas em abrigo meteorológico. Estas parametrizações são construídas visando a sua aplicação em estimativas simples e rápidas. Também se prestam para avaliações de níveis climatológicos da radiação. A seguir explicitam-se os modelos empíricos, doravante denominados modelos paramétricos clássicos ajustados para situação de céu aberto (sem nuvens). Na Tabela 1 são apresentados 13 modelos encontrados na literatura e que serão utilizados posteriormente neste trabalho.

Autor(es)	Coef. Originais
<b>1 - Ångström 1918</b> $I_{LW\downarrow} = [A - (B * 10^{-C * ea})] * \sigma * T^4$	A= 0,82 B= 0,25 C= 0,168
<b>2 - Brunt 1932</b> $I_{LW\downarrow} = [A + (B * \sqrt{ea})] * \sigma * T^4$	A= 0,52 B= 0,065
<b>3 - Anderson 1954</b> $I_{LW\downarrow} = [A + (B * \sqrt{10 * ea})] * \sigma * T^4$	A= 0,68 B= 0,036
<b>4 - Swinbank 1963</b> $I_{LW\downarrow} = (A * T^2) * \sigma * T^4$	A= $9,2 * 10^{-6}$
<b>5 - Idso &amp; Jackson 1969</b> $I_{LW\downarrow} = \{1 - A * \exp[B * (273 - T)^2]\} * \sigma * T^4$	A= 0,261 B= -0,0007
<b>6 - Brutsaert 1975</b> $I_{LW\downarrow} = \left[ A * \left( \frac{ea}{T} \right)^{\frac{1}{7}} \right] * \sigma * T^4$	A= 1,24
<b>7 - Satterlund 1979</b> $I_{LW\downarrow} = \left\{ A * \left[ 1 - \exp \left( -ea^{\frac{T}{B}} \right) \right] \right\} * \sigma * T^4$	A= 1,08 B= 2016
<b>8 - Idso 1981</b> $I_{LW\downarrow} = A + \left[ B * ea * \exp \left( \frac{1500}{T} \right) \right] * \sigma * T^4$	A= 0,7 B= 0,000595

<b>9 - Prata 1996</b>	$I_{LW} \downarrow = 1 - (1 + w) * \exp[-(A + B * w)^{0,5}] * \sigma * T^4$	A= 1,2 B= 3,0
<b>10 - Dille &amp; O'Brian 1998</b>	$I_{LW} \downarrow = A + \left[ B * \left( \frac{T}{273,16} \right)^6 \right] + \left( C * \sqrt{18,6 * \frac{w}{25}} \right)$	A= 59,38 B= 113,7 C= 96,96
<b>11 - Crawford &amp; Duchon 1999</b>	$I_{LW} \downarrow = A + \left\{ B * \left[ \text{sen} (m + 2) * \left( \frac{\pi}{6} \right) \right] * \left( \frac{ea}{T} \right)^{\frac{1}{7}} \right\} * \sigma * T^4$	A= 1,22 B= 0,06
<b>12 - Niemalä 2001</b>	$I_{LW} \downarrow = \{ A + [ B * (ea - 2) ] \} * \sigma * T^4$	A= 0,72 B= 0,009
<b>13 - Iziomon et al., 2003</b>	$I_{LW} \downarrow = \left\{ 1 - \left[ A * \exp \left( \frac{-B * ea}{T} \right) \right] \right\} * \sigma * T^4$	A= 0,35 B= 10,0

Tabela 1: Equações de alguns modelos de estimativa de  $I_{LW} \downarrow$  clássicos, com sua respectiva numeração para este trabalho, Autores e ano da publicação.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2 estão apresentados os valores dos parâmetros ajustados para o interior de uma estufa de polietileno na cidade de Botucatu, com seus respectivos coeficientes de ajuste  $R^2$ . A numeração da Tabela 2 acompanha a numeração na Tabela 1, com os respectivos modelos. Nos dados utilizados para o ajuste dos parâmetros foram usados apenas horas de céu limpo em dias de céu limpo, similarmemente aos trabalhos envolvendo os modelos clássicos, e com os valores trabalhados na partição horária e na unidade  $W m^{-2}$

Autor(es)	Coef. Ajustados	$R^2$
<b>1 - Ångström 1918</b> $I_{LW} \downarrow = [A - (B * 10^{-C * ea})] * \sigma * T^4$	A= 1,02 B= 0,24 C= 0,213	0.94316
<b>2 - Brunt 1932</b> $I_{LW} \downarrow = [A + (B * \sqrt{ea})] * \sigma * T^4$	A= 0,81 B= 0,087	0.94013
<b>3 - Anderson 1954</b> $I_{LW} \downarrow = [A + (B * \sqrt{10 * ea})] * \sigma * T^4$	A= 0,81 B= 0,027	0.94013
<b>4 - Swinbank 1963</b> $I_{LW} \downarrow = (A * T^2) * \sigma * T^4$	A= $1,3 * 10^{-3}$	--
<b>5 - Idso &amp; Jackson 1969</b> $I_{LW} \downarrow = \{ 1 - A * \exp[B * (273 - T)^2] \} * \sigma * T^4$	A= $0,003 * 10^{-2}$ B= $7,6075 * 10^{-8}$	0.77269
<b>6 - Brutsaert 1975</b> $I_{LW} \downarrow = \left[ A * \left( \frac{ea}{T} \right)^{\frac{1}{7}} \right] * \sigma * T^4$	A= 1,30	0.92586
<b>7 - Satterlund 1979</b> $I_{LW} \downarrow = \left\{ A * \left[ 1 - \exp \left( -ea^{\frac{T}{B}} \right) \right] \right\} * \sigma * T^4$	A= 0,25 B= 423	0.93805
<b>8 - Idso 1981</b> $I_{LW} \downarrow = A + \left[ B * ea * \exp \left( \frac{1500}{T} \right) \right] * \sigma * T^4$	A= 0,7 B= 0,000445	0.93431
<b>9 - Prata 1996</b> $I_{LW} \downarrow = 1 - (1 + w) * \exp[-(A + B * w)^{0,5}] * \sigma * T^4$	A= -- B= --	--

<b>10 - Dillely &amp; O'Brian 1998</b>	$A = -886,55$	
$I_{LW} \downarrow = A + \left[ B * \left( \frac{T}{273,16} \right)^6 \right] + \left( C * \sqrt{18,6 * \frac{w}{25}} \right)$	$B = 25360758,3$	<b>0.93055</b>
	$C = 637,29$	
<b>11 - Crawford &amp; Duchon 1999</b>		
$I_{LW} \downarrow = A + \left\{ B * \left[ \text{sen} (m + 2) * \left( \frac{\pi}{6} \right) \right] * \left( \frac{ea}{T} \right)^{\frac{1}{7}} \right\} * \sigma * T^4$	A= -- B= --	--
<b>12 - Niemalä 2001</b>		
$I_{LW} \downarrow = \{ A + [ B * (ea - 2) ] \} * \sigma * T^4$	A= 0,94 B= 0,023	0.93691
<b>13 - Iziomon et al., 2003</b>		
$I_{LW} \downarrow = \left\{ 1 - \left[ A * \exp \left( \frac{-B * ea}{T} \right) \right] \right\} * \sigma * T^4$	A= $-3,84 * 10^{-9}$ B= $-1,1 * 10^{-7}$	0.77269

Tabela 2: Coeficientes dos Modelos clássicos ajustados, seguindo a mesma numeração da Tabela 1.

Os modelos com melhor ajuste de parâmetro foram os modelos de Ångström (1918), Brunt (1932) e Anderson (1954) com R<sup>2</sup> acima de 0,94. Com os modelos de Swinbank (1963) Prata (1996) e Crawford & Duchon (1999) Não foi possível realizar a parametrização. Os modelos 6, 7, 8, 10 e 11, apresentaram R<sup>2</sup> acima de 0,9 enquanto que os modelos 5 e 13 apresentaram R<sup>2</sup> próximos de 0,7.

	Diferença relativa de A (%)	Diferença relativa de B (%)	Diferença relativa de C (%)
<b>1- Ångström 1918</b>	24,39	-3,57	26,73
<b>2- Brunt 1932</b>	55,77	33,21	--
<b>3- Anderson 1954</b>	19,12	-23,94	--
<b>4- Swinbank 1963</b>	14,03	--	--
<b>5- Idso &amp; Jackson 1969</b>	-99,99	-99,99	--
<b>6- Brutsaert 1975</b>	4,84	--	--
<b>7- Satterlund 1979</b>	-76,85	-79,02	--
<b>8- Idso 1981</b>	0	-25,21	--
<b>9- Prata 1996</b>	--	--	--
<b>10- Dillely &amp; O'Brian 1998</b>	-1593,01	22304876,5	557,27
<b>11- Crawford &amp; Duchon 1999</b>	--	--	--
<b>12- Niemalä 2001</b>	30,55	155,5	--
<b>13- Iziomon et al., 2003</b>	-100	-99,77	--

Tabela 3: diferença relativa dos parâmetros ajustados, seguindo a mesma numeração da Tabela 1.

## CONCLUSÕES

A parametrização de modelos clássicos para Botucatu demonstrou ser satisfatória. Alguns modelos ajustados podem ser usados na estimativa da radiação de ondas longas atmosféricas no lugar dos parâmetros originais, com elevados coeficientes de determinação. Modelos com base apenas na temperatura não apresentaram desempenho idêntico aos modelos dependentes da pressão de vapor e temperatura, que foram mais bem ajustados.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ångström, A. (1918). A study of the radiation of the atmosphere. Smithson. Misc. Collect, 65, 1-159.
- Blonquist JR, J. M., Tanner, B.D., Bugbee, B. (2009). Evaluation of measurement accuracy and comparison of two new and three traditional net radiometers. Agricultural and Forest Meteorology 149, 1709-1721.

- Brunt, D. (1932). Notes on radiation in the atmosphere. *Quart. J. R. Meteorological Society* 58, 389–418.
- Carvalho, L. A. De y Tessarioli Neto, J. (2005). Produtividade de tomate em ambiente protegido, em função do espaçamento e número de ramos por planta. *Horticultura Brasileira*, 23, 4, 986-989.
- Cunha, A. R. Da y Escobedo, J. F. (2003). Alterações micrometeorológicas causadas pelo uso de estufa plástica e seus efeitos no crescimento e produção da cultura de pimentão. *Revista Brasileira de Agrometeorologia* 11, 1, 15-26, 2003.
- Escobedo, J. F.; Gomes, E. N.; Oliveira, A. P.; Soares, J. (2011). Ratios of UV, PAR and NIR components to global solar radiation measured at Botucatu site in Brazil. *Renewable Energy*, 36, 169-178, 2011.
- Galvani, E.; Escobedo, J. F.; Cunha, A. R. Da; Klosowski, E. S.. (2000). Estimativa do índice de área foliar e da produtividade de pepino em meio protegido - cultivos de inverno e de verão. *Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental* 4, 1, 8-13.
- Heldwein, A. B., Streck, N. A., Sturza, V.S., Loose, L.H., Zanon, A. J., Toebe, M., Souza, A. T., Peters, M. B., Karlec, F. (2010). Plastocrono e rendimento de feijão-de-vagem cultivado sob ambiente protegido e no ambiente externo em semeadura tardia no outono. *Ciencia Rural* 40, 4, 768-773.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2014. Acesso em: <15/03/2015>. Disponível em: <<http://cod.ibge.gov.br/2378L>>.
- Khoshnevisan, B.; Rafiee, S.; Mousazadeh, H. (2013). Environmental impact assessment of open field and greenhouse strawberry production. *European Journal of Agronomy* 50, 29-37.
- Souza, J. L. y Escobedo, J. F. (1997). Balanço de Radiação em Cultivos de Feijão Vagem em Casa de Vegetação com Cobertura de Polietileno e no seu Exterior. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília 32, 1-15.

**ABSTRACT:** The objective of this work is to get the modelling of the atmospheric longwave radiation within an agricultural greenhouse polyethylene. These models (classic models) estimate solar radiation long-wave (LW) according to the air temperature ( $T_a$ ) and current vapor pressure ( $e_a$ ), and they are valid only for days to completely clear sky (cloudless). Measurements were made of the long-wave and short-wave radiation inside a polyethylene plastic greenhouse (100 microns) within one year. With these data, 13 models had their original parameter set (residual error minimized values) into the greenhouse. Of the 13 adjusted models, eight had a high correlation coefficient ( $r^2$  values greater than 0.9). Two models showed lower performance to the first group, with  $r^2$  values close to 0.7, and three models adjustment of the coefficients are not feasible.

**Keywords:** solar atmospheric long wave, greenhouse, modeling.