

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS

CÂMPUS BOTUCATU

**ESTUFA DE POLIETILENO: BALANÇO DE RADIAÇÃO E
PARAMETRIZAÇÃO DE MODELOS CLÁSSICOS DE ESTIMATIVA
DA RADIAÇÃO ATMOSFÉRICA DE ONDAS LONGAS**

LUCAS CARVALHO LENZ

Dissertação apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da UNESP - Campus
Botucatu, para obtenção do título de Mestre
em Agronomia (Energia na Agricultura)

BOTUCATU-SP

Setembro - 2016

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS

CÂMPUS BOTUCATU

**ESTUFA DE POLIETILENO: BALANÇO DE RADIAÇÃO E
PARAMETRIZAÇÃO DE MODELOS CLÁSSICOS DE ESTIMATIVA
DA RADIAÇÃO ATMOSFÉRICA DE ONDAS LONGAS**

LUCAS CARVALHO LENZ

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Dal Pai

Dissertação apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da UNESP - Campus
Botucatu, para obtenção do título de Mestre
em Agronomia (Energia na Agricultura)

BOTUCATU-SP

Setembro – 2016

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - DIRETORIA TÉCNICA DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

L575e Lenz, Lucas Carvalho, 1990-
Estufa de polietileno: balanço de radiação e parametrização de modelos clássicos de estimativa da radiação atmosférica de ondas longas / Lucas Carvalho Lenz. - Botucatu : [s.n.], 2016
ix, 55 f. : fots. color., ils.color., grafs. color., tabs.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2016
Orientador: Alexandre Dal Pai
Inclui bibliografia

1. Estufa (Plantas). 2. Radiação solar. 3. Radiação atmosférica. 4. Modelagem de dados. I. Dal Pai, Alexandre. II. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Câmpus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônômicas. III. Título.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

**TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: ESTUFA DE POLIETILENO: BALANÇO DE RADIAÇÃO E
PARAMETRIZAÇÃO DE MODELOS CLÁSSICOS DE ESTIMATIVA DA
RADIAÇÃO ATMOSFÉRICA DE ONDAS LONGAS**

AUTOR: LUCAS CARVALHO LENZ

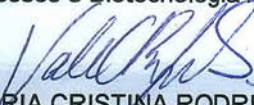
ORIENTADOR: ALEXANDRE DAL PAI

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em AGRONOMIA (ENERGIA NA AGRICULTURA), pela Comissão Examinadora:



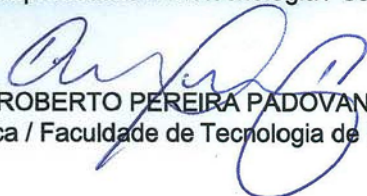
Prof. Dr. ALEXANDRE DAL PAI

Depto de Bioprocessos e Biotecnologia / Faculdade de Ciências Agrônomicas - UNESP



Profa. Dra. VALÉRIA CRISTINA RODRIGUES SARNIGHAUSEN

Departamento de Bioprocessos e Biotecnologia / Câmpus de Botucatu



Prof. Dr. CARLOS ROBERTO PEREIRA PADOVANI

Depto de Informática / Faculdade de Tecnologia de Botucatu

Botucatu, 14 de julho de 2016

Oferecimento

Ofereço este trabalho aos meus pais Elisama e José Luis e a Deus, sem eles eu nunca chegaria até aqui.

Agradecimentos

Expresso meus sinceros agradecimentos às seguintes pessoas que, de uma forma ou de outra, tiveram uma contribuição significativa na realização deste trabalho:

Ao professor Alexandre Dal Pai pela oportunidade oferecida e pelos valiosos conselhos prestados em minha formação.

Ao meu amigo Enzo Dal Pai

A todos os professores da UNESP-FCA.

A todos os funcionários da UNESP-FCA.

Às funcionárias da seção de pós-graduação e da Biblioteca da FCA que com paciência prestaram valorosas informações no decorrer do curso.

Aos meus irmãos André e Clara que me inspiraram a ser uma pessoa melhor.

Ao meu amor Marina.

SUMÁRIO

	Página
1. RESUMO.....	1
2. SUMMARY.....	3
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	5
3.1 Cultivo Protegido.....	5
3.2 Radiação Solar.....	6
3.3 Balanço de ondas curtas.....	7
3.4 Balanço de ondas longas.....	7
3.5 Saldo de radiação.....	8
3.6 Saldo de radiação em ambiente protegido.....	8
3.7 Índice Kt.....	9
3.8 Referências bibliográficas.....	10
4 CAPÍTULO 1 “SALDO DE RADIAÇÃO EM ESTUFA DE POLIETILENO”.....	14
4.1 Resumo.....	14
4.2 Introdução.....	15
4.2.1 Balanço de ondas curtas.....	17
4.2.2 Balanço de ondas longas.....	18
4.2.3 Saldo de Radiação.....	19
4.2.4 Saldo de Radiação em ambiente protegido.....	20
4.3 Materiais e Métodos.....	23
4.4 Resultados e Discussão.....	27
4.4.1 Evolução anual das radiações de ondas curtas: global interna e refletida.....	27

4.4.2 Evolução anual das radiações de ondas longas: atmosférica e terrestre.....	30
4.4.3 Evolução anual do saldo de radiação dentro da estufa.....	32
4.5 Conclusões.....	34
4.6 Referências.....	35
 5 CAPÍTULO 2 “PARAMETRIZAÇÃO DE EQUAÇÕES CLÁSSICAS DE ESTIMA DA RADIAÇÃO DE ONDAS LONGAS ATMOSFÉRICAS PARA O INTERIOR DE UMA ESTUFA DE POLIETILENO NA CIDADE DE BOTUCATU-SP”	40
5.1 Resumo.....	40
5.2 Introdução.....	41
5.3 Materiais e Métodos.....	43
5.4 Resultados e Discussão.....	50
5.5 Conclusões.....	54
5.6 Referências.....	55

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO II

Página

Tabela 1 - Equações de alguns modelos de estimativa de ILW↓ clássicos, com sua respectiva numeração para este trabalho, autores e ano da publicação.....	47
Tabela 2 - Coeficientes dos Modelos clássicos ajustados, seguindo a mesma numeração da Tabela 1.....	50
Tabela 3 - diferença relativa* dos parâmetros ajustados, seguindo a mesma numeração da Tabela 1.....	53

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I	Página
Figura 1 - Esquema da interação das radiações direta e difusa na estufa de polietileno.....	21
Figura 2 - Mapa mostrando a localização do município de Botucatu no estado de São Paulo.....	24
Figura 3 - a) Estufa vista de fora; b) Saldoradiômetro CNR1 <i>Net Radiometer</i>	24
Figura 4 – Séries climáticas de: a) temperatura e umidade b) precipitação no período de 1971 a 2009.....	26
Figura 5 - Evoluções anuais das radiações global $SW^{in}\downarrow$ e refletida $SW^{in}\uparrow$ dentro de estufa no período de 01/03/2008 a 28/03/2009.....	28
Figura 6 - a) Evolução anual do albedo; b) Evolução anual do saldo de radiação de ondas curtas no período de 01/03/2008 a 28/03/2009.....	29
Figura 7 - Evoluções anuais da onda longa atmosférica interna $LW_{atm}\downarrow$ e da onda longa terrestre interna $LW_{terr}\uparrow$, medidas de Março de 2008 a Fevereiro de 2009.....	30
Figura 8 Evolução anual do Balanço de Ondas Longas dentro de estufa, no período de 01/03/2008 a 28/03/2009.....	32
Figura 9 - a) evoluções anuais do Saldo de Radiação de Ondas Curtas e do Saldo de Radiação de Ondas Longas; b) Evolução anual do Saldo de Radiação dentro de estufa no período de 01/03/2008 a 28/03/2009.....	33
CAPÍTULO II	Página
Figura 1 - Mapa mostrando a localização do município de Botucatu no estado de São Paulo.....	44

Figura 2- Séries climáticas de a) temperatura e umidade b) precipitação no período de 1971 a 2009.....	45
Figura 3- Estufa vista de fora.....	45
Figura 4- Saldoradiômetro CNR1 Net Radiometer.....	46

**ESTUFA DE POLIETILENO: BALANÇO DE RADIAÇÃO E
PARAMETRIZAÇÃO DE MODELOS CLÁSSICOS DE ESTIMATIVA
DA RADIAÇÃO ATMOSFÉRICA DE ONDAS LONGAS.** Botucatu,
2016. 56p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura)
– Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.

Autor: LUCAS CARVALHO LENZ

Orientador: Dr. ALEXANDRE DAL PAI

1 RESUMO

O uso de ambientes protegidos na agricultura tem ganhado importância nas últimas décadas, por proporcionar ao agricultor a possibilidade de produzir produtos agrícolas de maior qualidade e possibilitar a produção em períodos em que normalmente a oferta de tais produtos é baixa, devido à inadequação das condições climáticas para o desenvolvimento das culturas (denominados períodos de entressafra), aumentando assim, o lucro obtido pelo produtor. O trabalho é composto por dois capítulos que se complementam e visam avaliar o comportamento da radiação solar no interior de uma estufa de polietileno e a parametrização de modelos clássicos de estimativa da radiação de ondas longas atmosféricas.

No Capítulo 1, o saldo de radiação foi medido por um saldo-radiômetro modelo CNR1 da *Kipp & Zonnen*, que tem a capacidade de medir as quatro componentes ao mesmo tempo: as radiações de ondas curtas (Global e Refletida) e as radiações de ondas longas (Atmosférica e Terrestre). As medidas foram realizadas no interior de uma estufa de polietileno tipo túnel durante período de 01/03/2008 a 28/03/2009, situada no campus da FCA, UNESP de Botucatu.

Posteriormente foi realizada uma análise climática do Saldo de Radiação (NR) e sua sazonalidade.

No Capítulo 2, Objetivou-se parametrizar modelos de estimativa da radiação de ondas longas atmosférica (LW) para o interior de uma estufa de polietileno em Botucatu - SP. Estes modelos (modelos clássicos) só tem validade para dias de céu completamente limpo (sem nuvens) e estimam a LW em função da temperatura do ar (T_a) e pressão atual de vapor (e_a). Foram feitas medidas das quatro componentes do saldo de radiação no interior de uma estufa plástica de polietileno (100 micra) no intervalo de um ano. Com estes dados 13 modelos da literatura tiveram seus parâmetros originais ajustados para o interior da estufa.

Palavras – chave: Estufa de Polietileno, Saldo de Radiação, Modelagem, Radiação de ondas longas atmosféricas.

**POLYETHYLENE GREENHOUSE: NET RADIATION AND
PARAMETRIZATION OF CLASSICAL MODELS TO ESTIMATE
THE ATMOSPHERIC LONG WAVE RADIATION.** Botucatu, 2016.
56p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura) –
Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.

Autor: LUCAS CARVALHO LENZ

Orientador: Dr. ALEXANDRE DAL PAI

2 SUMMARY

The use of greenhouses in agriculture has gained importance in recent decades, by giving the farmer the possibility to produce agricultural products of higher quality and enable the production in periods where normally the offer of such products is low due to the inadequacy of climate conditions for crop development (called off-season periods) , thus increasing the profit made by the producer. The work consists of two chapters that complement each other and seek to evaluate the behavior of solar radiation inside a polyethylene greenhouse and parameterization of classic estimation of radiation atmospheric long-wave models.

In Chapter 1, the net radiation was measured by a net-radiometer model CNR1 by Kipp & Zonnen, which has the capacity to measure the four components simultaneously: the shortwave radiation (Global and Reflected) and longwave radiation (Atmospheric and Terrestrial). The measurements were performed inside a tunnel type polyethylene greenhouse during the period of 01/03/2008 to 28/03/2009, located on the campus of FCA, UNESP Botucatu.

Later, a climatic analysis of the Net radiation (NR), and its seasonality was performed.

In Chapter 2, the objective is modeling the atmospheric longwave radiation (LW) into a polyethylene greenhouse in Botucatu - SP. These models (classical

models) are only valid for days of completely clear sky (without clouds) and estimate the LW depending on air temperature (T_a) and a steam current pressure (e_a). Measurements were made of the four components of the net radiation inside a polyethylene greenhouse (100 microns) within one year. From these data, 13 models of the literature had their original parameters adjusted.

Key – words: Polyethylene greenhouse, Net radiation, Modeling, Longwave atmospheric radiation

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Cultivo Protegido

Nas últimas décadas, o cultivo em estufas de polietileno vem aumentando consideravelmente, em vários países como meio de proteção às plantas e culturas agronômicas contra adversidades e variações climáticas. A grande vantagem desta técnica consiste na possibilidade de produção, principalmente de hortaliças e flores, nos períodos de entressafras, permitindo maior regularização de oferta e melhor qualidade dos produtos. 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).

3.2 Radiação Solar

A energia vinda do sol que atinge o planeta terra é chamada de Radiação Solar. Tal energia tem grande influência sobre o clima, é responsável pela formação de ventos, pelas chuvas, aquece superfícies e causa diversos fenômenos meteorológicos. A Radiação Solar é também responsável pelo desenvolvimento das plantas provendo energia para os processos de fotossíntese, transpiração, fotoperiodismo, formação e crescimento de tecidos, entre outros (MCCREE, 1972; GATES, 1976; CARMEÑO, 1990; BECKMANN et al., 2006; KITTAS et al., 2006).

Ondas de diversos comprimentos do espectro constituem a Radiação Solar na superfície terrestre. Usualmente, ela é separada em dois grupos distintos: radiação solar de ondas curtas (do inglês, *Short wave* - SW), que tem comprimentos de ondas no espectro no intervalo de 0,2 a 0,3 μm , e a radiação solar de ondas longas (do inglês, *long wave* LW), constituída de comprimentos de ondas no espectro no intervalo de 3 a 100 μm (AGUIAR et al, 2011).

O termo radiação solar é um termo genérico. Ao se trabalhar com a radiação solar, existem duas grandezas diferentes, que possuem significados e unidades distintos. A densidade de fluxo, ou Irradiância, é a potência incidente sobre uma unidade de área, sua unidade no Sistema Internacional (SI) é o W/m^2 . Convencionalmente letra I é utilizada como sigla para sua identificação (CHAVES & ESCOBEDO, 2000).

A densidade do fluxo integrada no tempo é chamada de Irradiação Solar, e usualmente é representada pela sigla H ou Q e representa a energia solar recebida por uma unidade de área em um período determinado. Sua unidade no SI é J/m^2 , ou, MJ/m^2 , quando esse termo é utilizado, deve-se saber a partição de tempo utilizada para o conhecimento real de sua magnitude (CHAVES & ESCOBEDO, 2000).

3.3 Balanço de ondas curtas

O espectro de radiação que incide sobre a superfície terrestre é predominantemente constituído de ondas curtas, ou seja, comprimentos de ondas entre 0,2 a 0,3 μm . Esta faixa do espectro é a responsável pelo fornecimento de energia para o crescimento e desenvolvimento das plantas. Para o estudo do balanço de energia no espectro de ondas curtas é necessário o entendimento das interações sofridas por essa radiação. Antes de atingir a superfície terrestre sofre atenuação, causada por absorção, difusão e reflexão de constituintes atmosféricos. Do total da energia incidente no topo da atmosfera (SW_0), apenas uma parte atinge a superfície ($\text{SW}_\downarrow$). A radiação global ($\text{SW}_\downarrow$) ao atingir a superfície sofrerá uma reflexão ($\text{SW}_\uparrow$). Essa reflexão ($\text{SW}_\uparrow$) será subtraída do total ($\text{SW}_\downarrow$) para a elaboração do saldo de ondas curtas

Valores do coeficiente de reflexão (α) já foram muito estudados sobre inúmeros tipos de superfícies vegetadas (PINKER et al, 1980; ASSIS et al, 1997; SOUZA et al., 2010).

3.4 Balanço de ondas longas

O balanço de ondas curtas não representa o total de energia radiante sobre a superfície terrestre. As radiações $\text{SW}_\downarrow$ e $\text{SW}_\uparrow$ interagem com a atmosfera e com a superfície, que ao adquirirem essa energia (na forma de calor) e passam a emití-la. Essa energia da superfície e atmosfera é emitida na faixa do espectro de ondas longas (3 a 45 μm). Essa energia, também conhecida como radiação termal é disponível para processos biológicos, processos térmicos do metabolismo vegetal, principalmente ao fornecimento de energia para o processo de evapotranspiração (PEREIRA et al, 2007, RANA & KATERJI, 2000).

A superfície e a atmosfera emitem energia em forma de ondas longas seguindo a equação de Stefan-Boltzman, onde essa emissão depende principalmente de sua própria capacidade de emitir energia e de sua temperatura elevada à quarta potência.

O balanço de radiação de ondas longas é constituído por duas componentes: a radiação de ondas longas oriundas do aquecimento da atmosfera, chamada radiação de onda longa atmosférica LW_{atm} ; e a radiação solar de onda longa terrestre LW_{terr} , oriunda do aquecimento da superfície(solo ou solo+cultura). Convencionou-se o uso de sinais na explicação do direcionamento do fluxo dessas radiações: a radiação de ondas longas atmosféricas LW_{atm} leva o sinal positivo pois na superfície sua presença é predominantemente no sentido para baixo $\downarrow$ (ganho de energia da superfície). A radiação solar de ondas longas terrestres LW_{terr} leva o sinal negativo por seu sentido ser preferencialmente para cima $\uparrow$ (perda de energia).

3.5 Saldo de radiação

O balanço de radiação é a contabilização dos ganhos e perdas no fluxo de radiação que incide sobre uma superfície terrestre. Também conhecido como saldo de radiação, é constituído por todo o espectro solar: ondas curtas e ondas longas.

O saldo de toda a energia incidente na faixa do espectro de ondas curtas adicionado ao saldo da energia incidente na faixa do espectro de ondas longas constitui o saldo de radiação

3.6 Saldo de radiação em ambiente protegido

O conhecimento do saldo de radiação no interior de ambientes protegidos tem grande utilidade na compreensão e prevenção de fenômenos desfavoráveis, como a formação de geadas (BECKMANN et al, 2006). Também ajuda a compreender

melhor as alterações causadas pelo plástico no regime térmico dentro dessas estruturas. Essas alterações microclimáticas têm importância por fornecerem melhores condições para as plantas. (KHOSHNEVISAN et al, 2013).

O saldo de radiação interno pode ser definido pelas mesmas componentes do saldo de radiação, medidas no interior da estufa e após sofrerem interações com o plástico

No espectro de ondas curtas a principal componente é a radiação global $SW^{in}\downarrow$. A radiação global externa $SW^{ex}\downarrow$ ao incidir sobre a cobertura de polietileno sofre os processos de reflexão e transmissão. A fração refletida é perdida e não contribui na medida $SW^{in}\downarrow$. A fração transmitida é a fração de interesse e já foi amplamente discutida na literatura especializada. A transmissividade na cobertura depende de vários fatores como o tipo e a espessura do polietileno (SOUSA et al., 2004), tempo de uso e quantidade de sujeiras depositadas em sua superfície (BECKMANN et al., 2006), ângulo de incidência (POLLET & PIETERS, 1999) e concentração de vapor de água na cobertura (Buriol et al., 1995), entre outros. A transmissividade depende ainda das condições do céu: a transmissão em dias de céu nublado 80,0% é maior que em dias de céu claro 78,0%. No geral, resultados mostram que a transmissividade da radiação global ($SW^{in}\downarrow / SW^{ex}\downarrow$) na cobertura de polietileno situa-se entre os valores de 70,0% a 80,0% (SOUSA et al., 2004).

3.7 Índice Kt

A Radiação solar que atinge o topo da atmosfera é denominada radiação solar extraterrestre, e corresponde à constante solar $I_{cs} = 1367 \text{ W/m}^2$. Ao interagir com a atmosfera, é atenuada através dos processos de reflexão, absorção e espalhamento. A radiação que chega à superfície é chamada de Radiação Global (G) (IQBAL, 1983).

Por apresentar variabilidade dependendo da hora do dia, da época do ano e da latitude, existe a dificuldade de se comparar dados da radiação solar em seus valores brutos, principalmente entre localidades climaticamente diferentes (SANTOS et al, 2003).

Desta forma, o índice Kt tem a finalidade de eliminar a dependência astronômica. Dividindo a radiação global pela radiação solar extraterrestre, eliminam-se as unidades e é obtido um valor adimensional variando entre 0 e 1. O valor de Kt representa a transmissividade atmosférica, a quantidade de energia solar que de fato atingiu a superfície do planeta. A relação global/extraterrestre pode ser realizada tanto por densidade de fluxo (W/m^2) quanto por irradiação (MJ/m^2) (DAL PAI & ESCOBEDO, 2001; ESCOBEDO et al, 2009).

Valores altos de Kt indicam céu limpo, com pouca nebulosidade, enquanto valores baixos de Kt representam céu com grande quantidade de nuvens. O Kt pode ser utilizado como um intervalo para classificar a cobertura do céu em quatro condições distintas: completamente nublado (de 0 a 0,35); parcialmente nublado com características de céu nublado (de 0,35 até 0,55); parcialmente nublado com características de céu claro (de 0,55 a 0,66); e céu aberto (acima de 0,65) (ESCOBEDO et al, 2009).

3.8 Referências bibliográficas

AGUIAR, L. J.G., COSTA, J. M. N., FISCHER, G. R., AGUIAR, R. G., COSTA, A. C. L. FERREIRA, W. P. M. Estimativa da radiação de onda longa atmosférica em área de floresta e de pastagem no sudoeste da Amazônia. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, p. 215-224, 2011.

ASSIS, S.V.; ESCOBEDO, J.F., 1997. Influência do ângulo de elevação solar no Albedo da cultura de alface (*Lactuca sativa* L.) medido em estufa de polietileno tipo túnel e externamente. CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 10, Piracicaba, p.476-478, 1997.

BECKMANN, M. Z. et al. Radiação solar em ambiente protegido cultivado com tomateiro nas estações verão-outono do Rio Grande do Sul. **Cienc. Rural**, v.36, n.1, p. 86-92, 2006.

BURIOL, G. A.; STRECK, N. A.; PETRY, C.; SCHNEIDER, F. M., Transmissividade a radiação solar do polietileno de baixa densidade utilizado em estufas. **Cienc. Rural**, v.25, n.1, p.1-4, 1995.

CARMEÑO, Z. S. **Estufas: instalação e manejo**. Lisboa: Litexa, 1990.

CARVALHO, L. A. de; TESSARIOLI NETO, J., Produtividade de tomate em ambiente protegido, em função do espaçamento e número de ramos por planta. **Hortic. Bras**, v.23, n.4, p. 986-989, 2005.

CHAVES, M. A.; ESCOBEDO, J. F. A software to process daily solar radiation data. **Renewable Energy**, v. 19, n.1-2, p. 339-344, 2000.

CUNHA, A. R. ; KLOSOWSKI, E. S.; GALVANI, E.; ESCOBEDO, J. F. MARTINS, D., Classificação climática para o município de Botucatu, SP, segundo Köppen. In: I SIMPÓSIO DE ENERGIA NA AGRICULTURA, 1999, Botucatu. Anais. Botucatu, SP: UNESP, Faculdade de Ciências Agronômicas, 1999. v. 2. p. 487-491, 1999.

DAL PAI, A.; ESCOBEDO, J. F. Influência da massa ótica nos valores instantâneos da fração solar difusa. **Energia na Agricultura**, v. 16, n.3, p. 1-6, 2001.

ESCOBEDO, J. F.; GOMES, E. N.; OLIVEIRA, A. P.; SOARES, J.R. Modeling hourly and daily fractions of UV, PAR and NIR to global solar radiation under various sky conditions at Botucatu, Brazil. **Applied Energy**, v. 86, p. 299-309, 2009.

GALVANI, E.; ESCOBEDO, J. F.; CUNHA, A. R. DA; KLOSOWSKI, E. S., Estimativa do índice de área foliar e da produtividade de pepino em meio protegido - cultivos de inverno e de verão. **Rev. bras. eng. agríc. ambient.**, v.4, n.1, p. 8-13, 2000.

GATES, W. L. Modeling the ice-age climate. **Science**, v. 191, p. 1138-1144, 1976.

HELDWEIN, A. B. et al., Plastocrono e rendimento de feijão-de-vagem cultivado sob ambiente protegido e no ambiente externo em semeadura tardia no outono. **Cienc. Rural**, v.40, n.4, p. 768-773, 2010.

IQBAL, M. **An introduction to solar radiation**. Nova Iorque, Academic Press, 1983. 390p.

KHOSHNEVISAN, B.; RAFIEE, S.; MOUSAZADEH, H., Environmental impact assessment of open field and greenhouse strawberry production. **European Journal of Agronomy**, v. 50, p. 29-37, 2013.

KITTAS, C. et al. Effect of two UV-absorbing greenhouse-covering films on growth and yield of an eggplant soilless crop. **Scientia Horticulturae**, v. 110, n. 1, p. 30-37, 2006.

MCCREE, K. J. Test of current definitions of photosynthetically active radiation against leaf photosynthesis data. **Agric. Meteorol.**, v. 10, p. 443-453, 1972.

PEREIRA, A. R.; GREEN, S.; VILLA NOVA, N. A., Relationships between single tree canopy and grass net radiations. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 142, n. 1, p. 45-49, 2007.

PINKER, R.T.; THOMPSON, O.E.; Eck, T.F., The Albedo of a tropical evergreen forest. **Quart. Journal of the Royal Met.Soc**, v. 106, p.551-558, 1980.

POLLET, I. V. AND J. G. PIETERS, Laboratory measurements of PAR transmittance of wet and dry greenhouse cladding materials. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 93, n. 2, p. 149-152, 1999.

RANA, G.; KATERJI, N., Measurement and estimation of actual evapotranspiration in the field under Mediterranean climate: a review. **European Journal of Agronomy**, vol. 13, n. 2-3, p. 125-153, 2000.

SANTOS, J. M.; PINAZO, J. M.; CAÑADA, J. Methodology for generating daily clearness index values K_t starting from the monthly average daily value K_t . determining the daily sequence using stochastic models. **Renewable Energy**, v. 28, p. 1523-1544, 2003.

SOUZA, J. L.; ESCOBEDO, J. F., Balanço de Radiação em Cultivos de Feijão Vagem em Casa de Vegetação com Cobertura de Polietileno e no seu Exterior. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 32, p. 1-15, 1997.

SOUZA, J. W. et al., Efeito do polietileno difusor de luz, sobre a radiação solar global, em ambiente protegido. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 12, p. 211-217, 2004.

SOUZA, P. J. de O. P. et al., Albedo da cultura da soja em área de avanço da fronteira agrícola na Amazônia. **Rev. bras. eng. agríc. ambient.**, v. 14, n. 1, p. 65-73, 2010.

4 CAPÍTULO 1: SALDO DE RADIAÇÃO EM ESTUFA DE POLIETILENO

4.1 RESUMO

O trabalho descreve uma análise climática e estatística do Balanço de Radiação em estufa de polietileno tipo túnel. O balanço de radiação é a soma das radiações de ondas curtas (Global e refletida) com as radiações de ondas longas (atmosférica e terrestre). As medidas foram feitas no período de 01/03/2008 a 28/03/2009, no campus da FCA, UNESP de Botucatu. As quatro radiações apresentam variações sazonais ao longo do ano: os valores médios mensais das radiações são maiores no período chuvoso, verão e primavera, nos quais são maiores as concentrações de nuvens e vapor de água dentro da estufa, e menores no outono e inverno, no período da seca, onde são menores as concentrações de nuvens e vapor de água na estufa. Os valores médios mensais das radiações de ondas curtas foram: Global = $12,7 \text{ MJ/m}^2$ e refletida = $1,67 \text{ MJ/m}^2$, enquanto que as radiações de ondas longas foram: atmosférica = $36,3 \text{ MJ/m}^2$ e terrestre = $-40,8 \text{ MJ/m}^2$. O valor do saldo de radiação de ondas curtas $\text{NR}_{\text{SW}} = (\text{global} - \text{refletida})$ médio anual obtido foi de $11,2 \text{ MJ/m}^2$, enquanto que o saldo de radiação de ondas longas $\text{NR}_{\text{LW}} = (\text{atmosférica} + \text{terrestre})$ médio anual obtido foi de $-3,7 \text{ MJ/m}^2$. Portanto, o Saldo de Radiação total $\text{NR} = (\text{NR}_{\text{SW}} + \text{NR}_{\text{LW}})$ médio anual obtido foi de $8,5 \text{ MJ/m}^2$.

Palavras-chave: Balanço de energia; Estufa de polietileno; Radiação de ondas longas

4.2 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o cultivo em estufas de polietileno vem aumentando consideravelmente, em vários países como meio de proteção às plantas e culturas agrônômicas contra adversidades e variações climáticas. A grande vantagem desta técnica consiste na possibilidade de produção, principalmente de hortaliças e flores, nos períodos de entressafras, permitindo maior regularização de oferta e melhor qualidade dos produtos. 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).

Pesquisas realizadas em diversas regiões do Brasil a partir dos anos 90 e em outros locais mostram que as alterações microclimáticas são os principais fatores responsáveis pelo aumento de produtividade das culturas (FARIAS et al, 1993; ESCOBEDO et al, 1994; FRISINA & ESCOBEDO, 1999; HOLCMAN & SENTELHAS, 2012; GALVANI et al, 2001, CUNHA et al, 2002; PEZZOPANE ET al, 1995; COSTA et al, 2010; BECKMANN et al, 2006). Outros resultados mostram ainda que a cobertura de polietileno também é responsável pelo aumento da produtividade das culturas, pois no processo de interação das radiações direta na incidência normal e difusa do espectro total, há um aumento das frações PAR-global e PAR-difusa do espectro PAR (ESCOBEDO et al, 2011). O aumento das radiações PAR-global e PAR-difusa, faixa espectral de comprimentos de onda de 0,4 a 0,7 μm , faz com que as plantas absorvam mais energia solar e a convertam em matéria orgânica através do processo de fotossíntese. As radiações difusa e PAR-difusa por atingirem área foliar mais homoganeamente são mais eficientes no processo de fotossíntese (HUAWEI et al, 2010).

Em ambientes protegidos vários autores já fizeram estudos sobre a relação do balanço de radiação com as culturas agrícolas (SOUZA et al, 1997; FRISINA et al, 1999; GALVANI et al, 2001, CUNHA et al, 2002, PEREIRA et al, 2007). Nestes estudos os valores do saldo de radiação ou de suas componentes foram estimados por métodos como Bowen(1926) e Brunt(1932) a partir de outros elementos meteorológicos(como temperatura, radiação global, fluxo de calor no solo, pressão de vapor d'água). Não há medição direta das quatro componentes do balanço de radiação (Global, refletida, onda longa atmosférica e onda longa terrestre) com o uso destes métodos.

Considerando que o conhecimento do saldo de radiação é importante para qualquer cultura agrícola por fornecer a energia para o processo de evapotranspiração e afetando diretamente a demanda hídrica, este trabalho tem por objetivo apresentar resultados da medição realizados durante um ano dentro de uma estufa de polietileno sem cultura. A partir dos resultados efetuar uma análise climática media mensal para a análise da sazonalidade, não só das radiações como dos balanços de ondas curtas , ondas longas e do saldo de radiação total.

4.2.1 Balanço de ondas curtas

O espectro de radiação que incide sobre a superfície terrestre é predominantemente constituído de ondas curtas, ou seja, comprimentos de ondas entre 0,3 a 2,8 μm . Esta faixa do espectro é a responsável pelo fornecimento de energia para o crescimento e desenvolvimento das plantas. Para o estudo do balanço de energia no espectro de ondas curtas é necessário o entendimento das interações sofridas por essa radiação. Antes de atingir a superfície terrestre sofre atenuação, causada por absorção, difusão e reflexão de constituintes atmosféricos. Do total da energia incidente no topo da atmosfera (SW_0), apenas uma parte atinge a superfície ($\text{SW}_\downarrow$). A radiação global ($\text{SW}_\downarrow$) ao atingir a superfície sofrerá uma reflexão ($\text{SW}_\uparrow$). Essa reflexão $\text{SW}_\uparrow$ será subtraída do total $\text{SW}_\downarrow$ para a elaboração do saldo de ondas curtas, conforme a equação:

$$\text{NR}_{\text{sw}} = \text{SW}_\downarrow - \text{SW}_\uparrow \quad (1)$$

A magnitude dessa perda por reflexão $\text{SW}_\uparrow$ dependerá de propriedades da superfície, como rugosidade e cor. Essa característica da superfície de refletir é conhecida como poder de reflexão ou Albedo (r), definido por:

$$r = \text{SW}_\uparrow / \text{SW}_\downarrow \quad (2)$$

Valores do coeficiente de reflexão (r) já foram muito estudados sobre inúmeros tipos de superfícies vegetadas (PINKER et al, 1980; ASSIS et al, 1997; SOUZA et al., 2010). Com o conhecimento do Albedo e da radiação global medida na superfície é possível estimar a radiação refletida $\text{SW}_\uparrow$ pela equação:

$$\text{SW}_\uparrow = \text{SW}_\downarrow * r \quad (3)$$

e conseqüentemente, o balanço de ondas curtas:

$$NR_{sw} = SW\downarrow - (SW\downarrow * r) \quad (4)$$

Ou:

$$NR_{sw} = SW\downarrow * (1-r) \quad (5)$$

4.2.2 Balanço de ondas longas

O balanço de ondas curtas não representa o total de energia radiante sobre a superfície terrestre. As radiações $SW\downarrow$ e $SW\uparrow$ interagem com a atmosfera e com a superfície, que ao adquirirem essa energia (na forma de calor) e passam a emití-la. Essa energia da superfície e atmosfera é emitida na faixa do espectro de ondas longas (3 a 45 μm). Essa energia, também conhecida como radiação termal é disponível para processos biológicos, processos térmicos do metabolismo vegetal, principalmente ao fornecimento de energia para o processo de evapotranspiração (PEREIRA et al, 2007, RANA & KATERJI, 2000).

A superfície e a atmosfera emitem energia em forma de ondas longas seguindo a equação de Stefan-Boltzman, onde essa emissão depende principalmente de sua própria capacidade de emitir energia e de sua temperatura elevada à quarta potência:

$$E = \epsilon * \sigma * T^4 \quad (6)$$

onde E é a energia emitida por um corpo com temperatura acima de 0 K; ϵ é a emitância do corpo, σ é a constante de Stefan-Boltzman e T é a temperatura do corpo.

O balanço de radiação de ondas longas é constituído por duas componentes: a radiação oriunda do aquecimento da atmosfera, chamada radiação de onda longa atmosférica LW_{atm} ; e a radiação solar de onda longa terrestre LW_{terr} , oriunda do aquecimento da superfície(solo ou solo+cultura). Convencionou-se o uso de sinais na

explicação do direcionamento do fluxo dessas radiações: a radiação de ondas longas atmosféricas LW_{atm} leva o sinal positivo pois na superfície sua presença é predominantemente no sentido para baixo $\downarrow$ (ganho de energia da superfície). A radiação solar de ondas longas terrestres LW_{terr} leva o sinal negativo por seu sentido ser preferencialmente para cima $\uparrow$ (perda de energia). Logo, a equação que explica o saldo de radiação de ondas longas:

$$NR_{LW} = LW_{atm\downarrow} - LW_{terr\uparrow} \quad (7)$$

onde NR_{LW} é o saldo de radiação de ondas longas, $LW_{atm\downarrow}$ é a radiação de ondas longas atmosféricas e $LW_{terr\uparrow}$ é a radiação de ondas longas terrestres.

4.2.3 Saldo de radiação

O balanço de radiação é a contabilização dos ganhos e perdas no fluxo de radiação que incide sobre uma superfície terrestre. Também conhecido como saldo de radiação, é constituído por todo o espectro solar: ondas curtas e ondas longas.

O saldo de toda a energia incidente na faixa do espectro de ondas curtas adicionado ao saldo da energia incidente na faixa do espectro de ondas longas constitui o saldo de radiação, com a equação:

$$NR = NR_{SW} + NR_{LW} \quad (8)$$

onde NR é o saldo de radiação ou balanço de radiação; NR_{SW} é o balanço de ondas curtas e NR_{LW} é o balanço de ondas longas. Fazendo-se a substituição do NR_{SW} e do NR_{LW} com suas próprias equações apresentam-se as quatro componentes do saldo total de radiação:

$$NR = SW_{\downarrow} + SW_{\uparrow} + LW_{atm\downarrow} - LW_{terr\uparrow} \quad (9)$$

4.2.4 Saldo de radiação em ambiente protegido

O conhecimento do saldo de radiação no interior de ambientes protegidos tem grande utilidade na compreensão e prevenção de fenômenos desfavoráveis, como a formação de geadas (BECKMANN et al, 2006). Também ajuda a compreender melhor as alterações causadas pelo plástico no regime térmico dentro dessas estruturas. Essas alterações microclimáticas têm importância por fornecerem melhores condições para as plantas. (KHOSHNEVISAN et al, 2013).

O saldo de radiação interno pode ser definido pelas mesmas componentes do saldo de radiação, medidas no interior da estufa e após sofrerem interações com o plástico:

$$NR^{in} = SW^{in}\downarrow + SW^{in}\uparrow + LW^{in}_{atm}\downarrow - LW^{in}_{terr}\uparrow \quad (10)$$

Estas componentes não são iguais às suas componentes externas. A cobertura de polietileno provoca alterações ao transmiti-las para o interior da estufa.

No espectro de ondas curtas a principal componente é a radiação global $SW^{in}\downarrow$. A radiação global externa $SW^{ex}\downarrow$ ao incidir sobre a cobertura de polietileno sofre os processos de reflexão e transmissão. A fração refletida é perdida e não contribui na medida $SW^{in}\downarrow$. A fração transmitida é a fração de interesse e já foi amplamente discutida na literatura especializada. A transmissividade na cobertura depende de vários fatores como tipo e espessura da cobertura (SOUSA et al., 2004), tempo de uso e quantidade de sujeiras depositadas na cobertura (BECKMANN et al., 2006), ângulo de incidência (POLLET & PIETERS, 1999) e concentração de vapor de água na cobertura (BURIOL et al., 1995; FARKAS et al. 2001), entre outros. A transmissividade depende ainda das condições do céu: a transmissão em dias de céu nublado 80,0% é maior que em dias de céu claro 78,0% (FARKAS et al. 2001).

No geral, resultados mostram que a transmissividade da radiação global ($SW^{in}\downarrow / SW^{ex}\downarrow$) na cobertura de polietileno situa-se entre os valores de 70,0% a 80,0% (SOUSA et al., 2004).

A radiação global divide-se em duas componentes: fração global direta e fração global difusa. A radiação solar direta é a fração da radiação solar global que não sofre interação com elementos constituintes atmosféricos e incide de modo unidirecional. A radiação global difusa é a fração da radiação solar global que interage com algum elemento atmosférico e sofre espalhamento multidirecional. As radiações direta e difusa do espectro total (0,3 a 2,8 μm) ao interagirem com a cobertura de polietileno tipo túnel são transmitidas para dentro da estufa, como mostra o esquema na Figura 1:

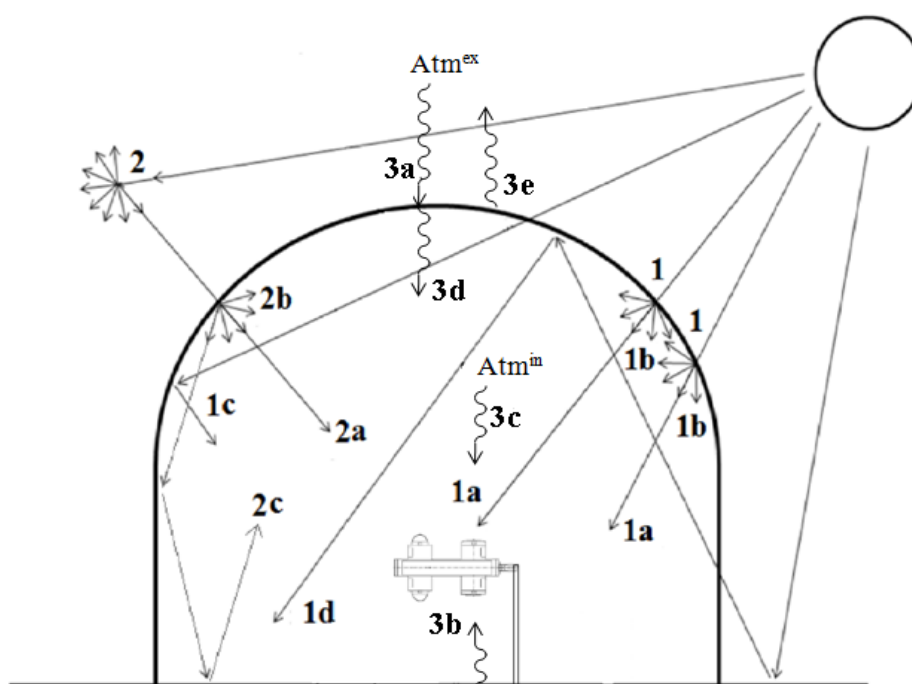


Figura 1 - Esquema da interação das radiações direta e difusa na estufa de polietileno.

As radiações direta e difusa, após interagirem com a cobertura de polietileno, contribuem nas medidas das radiações global $SW^{\text{in}}_{\downarrow}$ com as seguintes componentes: 1- direta transmitida; 1b- direta espalhada; 1c-refletida; 1d-multirefletidas das superfícies horizontal interna e externa, e então espalhada ou refletida novamente na cobertura. A radiação difusa contribui na medida $SW^{\text{in}}_{\downarrow}$ com as componentes: 2- radiação difusa externa transmitida direcionalmente, 2b- difusa espalhada e 2c- difusas refletidas na cobertura e todas as demais irradiancias difusas que sofreram múltiplas reflexões na superfície horizontal e na cultura.

Similarmente, as radiações direta e difusa após interagirem com a cobertura de polietileno contribuem nas medidas da radiação refletida solar somente a componente: 1b- direta espalhada; 1c-refletida; 1d-multirefletidas das superfícies horizontal interna e externa, e então espalhada ou refletida novamente na cobertura. A componente refletida 1c tem grande dependência com o tipo de cobertura do solo, ou das propriedades da cultura implantada no interior da estufa (Assis et al, 1997). Em geral culturas com colorações mais claras têm maior Albedo, ou poder de reflexão, e conseguem elevar os valores de $SW^{in}\uparrow$.

As radiações de ondas longas são consideradas ondas com baixas quantidades de energia (3 a 45 μm). Por ter essa natureza termal essas ondas não sofrem transmissão na cobertura de polietileno, mas sim absorção pelo polietileno. A cobertura ao absorver esta energia sofre um aquecimento passa a emitir multidirecionalmente essa energia. A radiação de ondas longas atmosférica externa $LW^{ex}_{atm} \downarrow$ (componente 3a na Figura 1) é absorvida pela cobertura e emite uma fração dessa energia de volta para a atmosfera (3e) e uma fração dessa energia para o interior da estufa (3d). Similarmente ao ambiente fora da estufa o solo adquire energia térmica e também passa a emitir energia ($LW^{in}_{terr}\uparrow$: componente 3b da Figura 1). Devido ao confinamento e à ausência de trocas convectivas de calor no interior de uma estufa, as componentes 3b ($LW^{in}_{terr}\uparrow$) e 3d provocam um aumento na temperatura da atmosfera interna, ocasionando uma temperatura no interior da estufa maior em comparação à temperatura externa da estufa. Essa atmosfera interna mais aquecida emitirá uma quantidade maior de energia em relação ao meio externo. A radiação de ondas longas atmosférica interna $LW^{in}_{atm} \downarrow$ será representada pela soma das componentes 3c e 3d.

4.3 MATERIAIS 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°53'09"S; 48°26'42"W e altitude média 786m) é um município brasileiro localizado na região centro-oeste do Estado de São Paulo (Figura 2), possui área total de 1.482,642 km² e população estimada em 2015 de aproximada de 127.308 mil habitantes (IBGE, 2015). 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 2- Mapa mostrando a localização do município de Botucatu no estado de São Paulo.

A Figura 3a mostra uma fotografia da estufa utilizada no trabalho. Área de 168m², tipo túnel alto, com cobertura de polietileno (100µm). Suas dimensões: 24m de comprimento, 7m de largura, 2m de pé direito e 1,7 m de altura da concavidade.

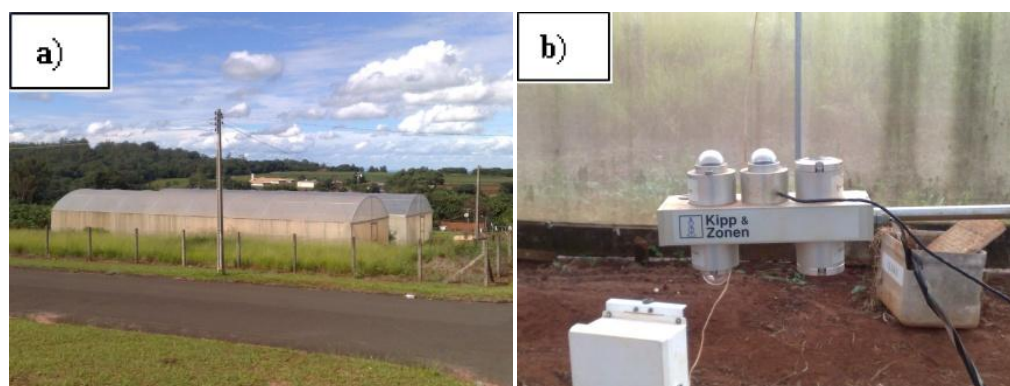


Figura 3 - a) Estufa vista de fora; b) Saldoradiômetro CNR1 *Net Radiometer*.

Para a medida do saldo de radiação foi utilizado um saldo-radiômetro modelo CNR1 da *Kipp & Zonnen*. Este aparelho (Figura 3b) 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). Na Figura 3b o saldoradiômetro está em período de calibração, tendo sua medida comparada a outro piranômetro referencial. A calibração foi aferida no início 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.

A Figura 4 (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 ($23,216 \pm 1,20^{\circ}\text{C}$), o mais frio julho ($17,16 \pm 1,33^{\circ}\text{C}$) e a temperatura do ar média anual de $20,46 \pm 2,21^{\circ}\text{C}$ (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.

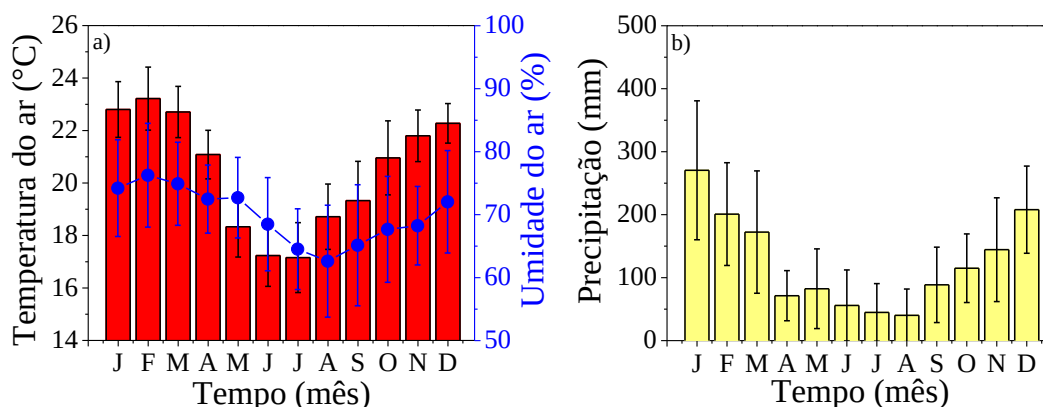


Figura 4- Séries climáticas de: a) temperatura e umidade b) precipitação no período de 1971 a 2009.

A radiação global externa $SW^{ex}\downarrow$ é medida rotineiramente na estação de radiometria solar da Faculdade de Ciências Agrárias-FCA-UNESP-Botucatu-SP, por um piranômetro *Eppley* PSP. Seus valores foram disponibilizados para este trabalho durante o período do experimento. Tanto as medições dentro da estufa de polietileno quanto as medidas externas usaram a mesma frequência de aquisição de dados. Os dados de radiação passaram por um controle de qualidade, com eliminação de valores discrepantes e horários antes do nascer e após o por do sol. Os dados de irradiância, em W/m^2 , foram integrados na partição diária, tendo como unidade o MJ/m^2 dia. Sendo assim, todos os valores de radiação representam valores diários de energia incidente sobre a superfície (CHAVES & ESCOBEDO, 2000).

4.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.4.1 Evolução anual das radiações de ondas curtas: global interna e refletida

A Figura 5 mostra a evolução anual das radiações global interna $SW^{in}\downarrow$ e a refletida $SW^{in}\uparrow$ médias mensais diárias dentro da estufa de polietileno em Botucatu, no período entre março de 2008 a fevereiro de 2009. É evidente que as radiações $SW^{in}\downarrow$ e $SW^{in}\uparrow$ seguem as variações sazonais de $SW^{ex}\downarrow$ ao longo do ano: em geral os valores médios mensais das radiações $SW^{in}\downarrow$ e $SW^{in}\uparrow$ são mais elevados no período chuvoso, verão e primavera, e menos elevados, no outono e inverno, no período da seca. A sazonalidade é devido à variação astronômica do sol (declinação do sol), latitude (local), e principalmente, devido às variações climáticas das nuvens e vapor d'água, características de cada mês, ou estação do ano. No verão e primavera, a energia da radiação é mais elevada, porque o sol declina no hemisfério sul mais próximo da latitude local (-23,510) que quando declina no hemisfério norte, durante o outono e inverno.

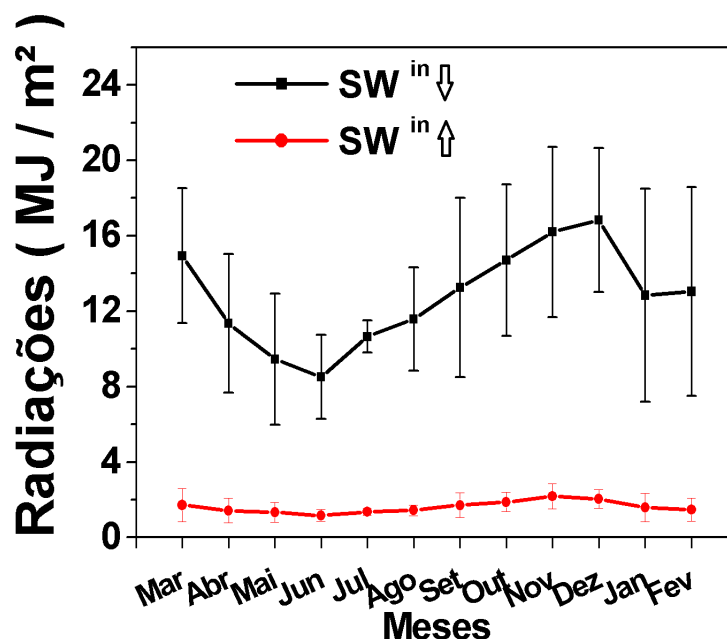


Figura 5 - Evoluções anuais das radiações global $SW^{in}\downarrow$ e refletida $SW^{in}\uparrow$ dentro de estufa no período de 01/03/2008 a 28/03/2009.

O valor de $SW^{in}\downarrow$ variou de 8,5 MJ/m² no mês de junho a 16,8 MJ/m² no mês de dezembro enquanto que, a o valor de $SW^{in}\uparrow$ variou de 1,2 MJ/m² no mês de junho a 2,18 MJ/m² no mês de novembro. O valor médio anual de $SW^{in}\downarrow$ foi igual a 12,7 MJ/m², enquanto que o valor médio anual de $SW^{in}\uparrow$ de 1,67 MJ/m².

A Figura 6a mostra os valores médios anual do Albedo(r) e a Figura 6b mostra os valores médios anual do Balanço de Ondas Curtas (NR_{SW}). Os valores do Albedo diário foi calculados por meio da relação $r = SW^{in}\uparrow / SW^{in}\downarrow$ enquanto que os valores do $NR_{SW} = SW^{in}\downarrow - SW^{in}\uparrow$. A evolução anual na Fig. 6a mostra que as variações do Albedo médio mensal são sazonais e dependem das variações climáticas: os valores de (r) são menores no período úmido, meses de outubro a março, nos quais a nebulosidade e a concentração do vapor de água são mais elevadas no ano.

Ao contrario são maiores no período seco, meses de abril a setembro, nos quais a nebulosidade e concentração do vapor de água são menores no ano. No período seco a frequência de dias de céu claro e concentração de aerossóis na atmosfera são maiores no ano. A presença de material particulado na cobertura de polietileno, bem como no ar dentro da estufa de polietileno é um fator de espalhamento das radiações, diminuindo a radiação refletida direcionadas anisotropicamente. No período úmido os valores do Albedo variaram de

11,3% em fevereiro a 13,4% em novembro, e no período seco de 12,5 % em Agosto a 13,7 % em julho. Nos meses de abril, maio e julho em que a concentração de aerossóis é menor da seca, aos valores do Albedo, foram superiores aos valores do Albedo nos meses de agosto e setembro, com maior concentração de aerossóis. No total o valor do Albedo médio anual foi de 12,6%.

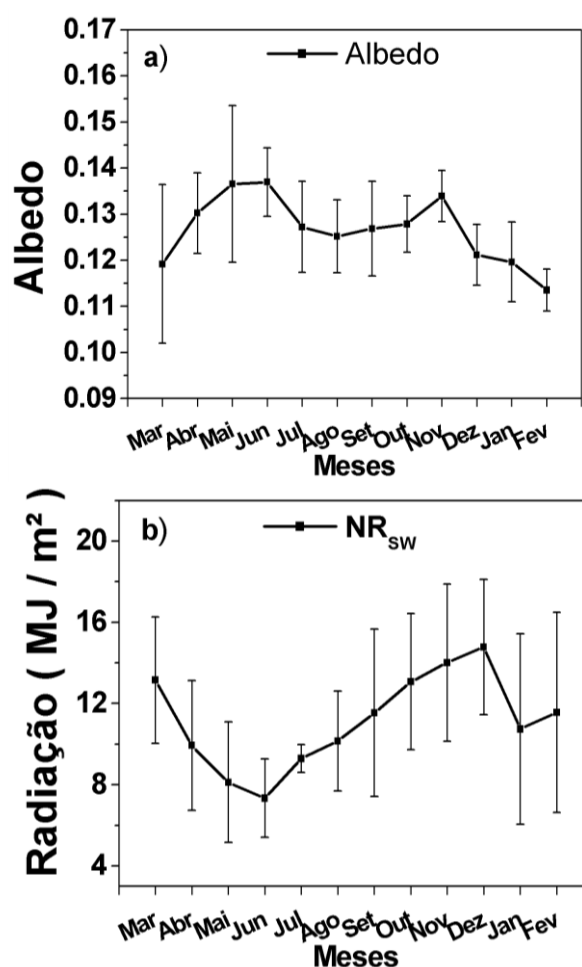


Figura 6 - a) Evolução anual do Albedo; b) Evolução anual do saldo de radiação de ondas curtas no período de 01/03/2008 a 28/03/2009.

Similarmente, a evolução anual na Figura 6b mostra que as variações do NR_{sw} médio mensal são sazonais e dependem das variações climáticas: os valores do NR_{sw} são maiores no período úmido, meses de outubro a março, nos quais a nebulosidade e a concentração do vapor de água são mais elevadas no ano. Por outro lado,

são menores no período seco, meses de abril a setembro, nos quais a nebulosidade e concentração do vapor de água são menores no ano. No período seco os valores do NR_{SW} variaram de 7,3% MJ/m² em junho a 11,5 MJ/m² em setembro, e no período úmido de 14,8 MJ/m² em dezembro a 10,7 MJ/m² em janeiro. No total o valor do NR_{SW} médio anual foi de 11,2 MJ/m².

4.4.2 Evolução anual das radiações de ondas longas: atmosférica e terrestre

A Figura. 7 mostra a evolução anual das radiações de ondas longas: atmosférica e terrestre (médias mensais diárias dentro da estufa de polietileno em Botucatu, no período entre março de 2008 a fevereiro de 2009).

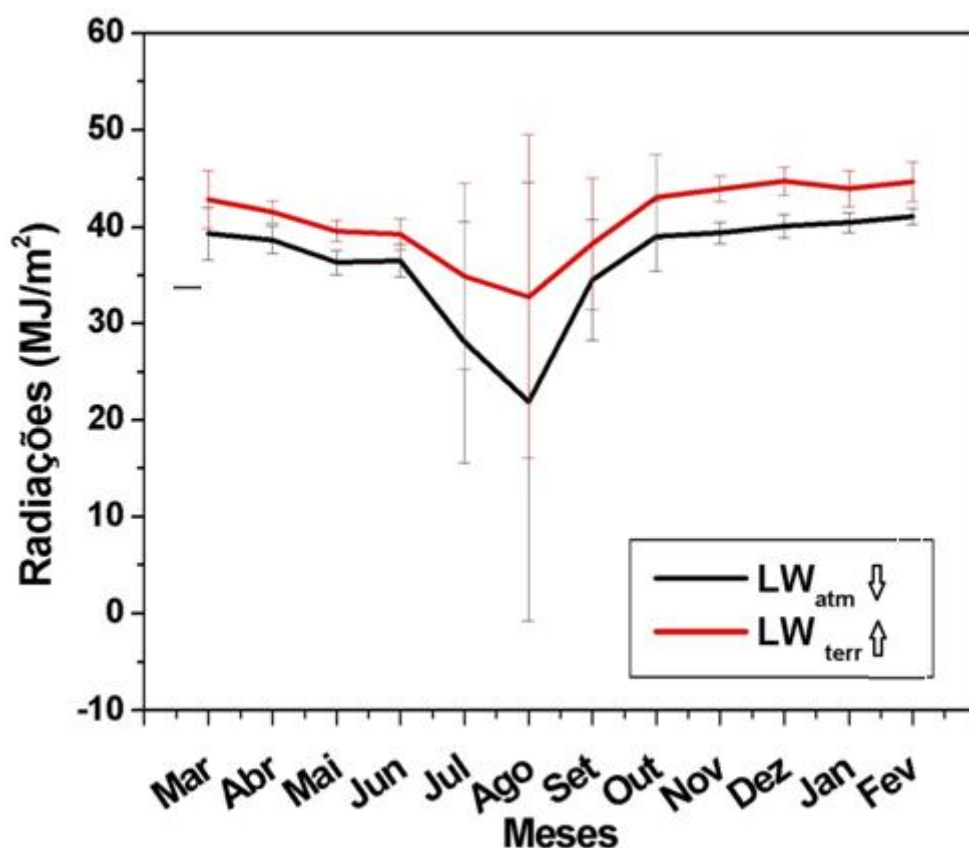


Figura 7 - Evoluções anuais da onda longa atmosférica interna $LW_{atm\downarrow}$ e da onda longa terrestre interna $LW_{terr\uparrow}$, medidas de Março de 2008 a Fevereiro de 2009

O maior valor de $LW_{atm\downarrow} = 40,6 \text{ MJ/m}^2$ apresentada na Figura 7, decresceu de março, no qual a temperatura e umidade são elevados, até agosto no qual a temperatura e umidade são menores no ano atingindo o menor valor de $LW_{atm\downarrow} = 21,9 \text{ MJ/m}^2$. Posteriormente, a radiação atmosférica cresceu até atingir o maior valor de $LW_{atm\downarrow}^{in} = 41,1 \text{ MJ/m}^2$ em fevereiro, mês mais quente e mais úmido do ano. O valor de $LW_{atm\downarrow}^{in}$ médio anual foi $36,3 \text{ MJ/m}^2$.

Por outro lado, a evolução anual de $LW_{terr\uparrow}$ apresentada na Figura 7 acompanhou as evoluções anuais da temperatura e umidade, porem de forma inversa a evolução de $LW_{atm\downarrow}$. O valor de $LW_{terr\uparrow} = -42,7 \text{ MJ/m}^2$ cresceu de março, no qual a temperatura e umidade são elevados, até agosto no qual a temperatura e umidade são menores no ano atingindo o menor valor de $LW_{terr\uparrow} = -44,8 \text{ MJ/m}^2$. Posteriormente, a radiação terrestre decresceu até atingir o maior valor $LW_{terr\uparrow} = -32,8 \text{ MJ/m}^2$ em fevereiro, mês mais quente e úmido do ano. O valor de $LW_{terr\uparrow}$ médio anual foi $-40,8 \text{ MJ/m}^2$.

Os valores das radiações $LW_{atm\downarrow}$ emitida pela atmosfera e $LW_{terr\uparrow}$ emitida pela superfície terrestre, médias mensais são maiores positivamente e negativamente, respectivamente no período chuvoso, verão e primavera, e menores no outono e inverno, no período da seca. A sazonalidade é devido às variações climáticas da temperatura, nebulosidade e principalmente vapor d'água, características de cada mês, ou estação do ano. No verão e primavera, a temperatura ambiente, as concentrações de nuvens e vapor de água são maiores no ano, enquanto que no outono e inverno, as temperaturas, concentrações de nuvens e vapor de água na atmosfera são menores do ano.

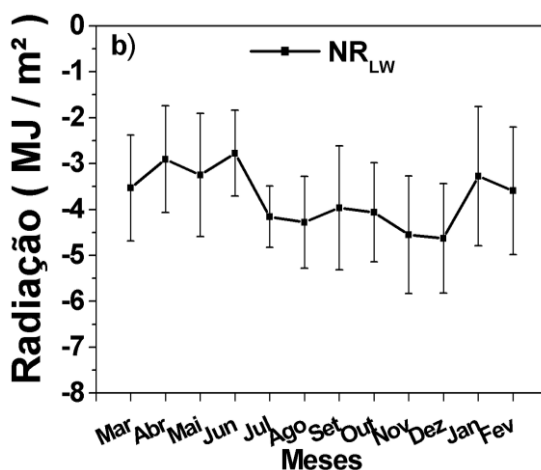


Figura 8 - Evolução anual do Balanço de Ondas Longas dentro de estufa, no período de 01/03/2008 a 28/03/2009.

A evolução anual do balanço de radiação de ondas longas obtido por meio da equação $NR_{LW} = LW_{atm\downarrow}^{in} - LW_{terr\uparrow}^{in}$ (Figura 8) mostra que o fluxo de energia resultante é negativo em todos os meses dentro da estufa de polietileno, e portanto há de perda de energia no sentido da superfície terrestre para a atmosfera. O valor do NR_{LW} variou de - 2,8 MJ/m² em junho a - 4,6 MJ/m² em dezembro. O valor de $LW_{terr\uparrow}^{in}$ médio anual foi -40,8 MJ/m². O valor do $NR_{LW} = LW_{atm\downarrow}^{in} - LW_{terr\uparrow}^{in}$ médio anual foi - 3,7 MJ/m².

4.4.3 Evolução anual do saldo de radiação dentro da estufa

A Figura 9a mostra a evolução anual dos balanços de Radiações de Ondas Curtas (NR_{SW}) e de Radiações de Ondas Longas (NR_{LW}) médias mensais diárias dentro da estufa de polietileno em Botucatu, no período entre março de 2008 a fevereiro de 2009. Como mencionado anteriormente, o NR_{SW} com valores positivos expressa a entrada de energia da atmosfera em todos os meses no ano para dentro da estufa de polietileno, enquanto que o NR_{LW} com valores negativos expressa a saída de energia da superfície terrestre de dentro da estufa em todos os meses no ano. O Saldo de Radiação (NR)

mostrado na Figura 9b foi calculado pela soma entre os dois balanços de radiação: $NR = \text{Ondas Curtas} + \text{Ondas Longas} = NR_{SW} + NR_{LW}$.

Os valores positivos de NR em todos os meses do ano expressa entrada de energia na estufa de polietileno. A evolução anual de NR segue as tendências sazonais do NR_{SW} e depende das variações climáticas: os valores de NR são maiores nos meses de outubro a março do período úmido, nos quais as concentrações de nuvens e de vapor de água são maiores no ano.

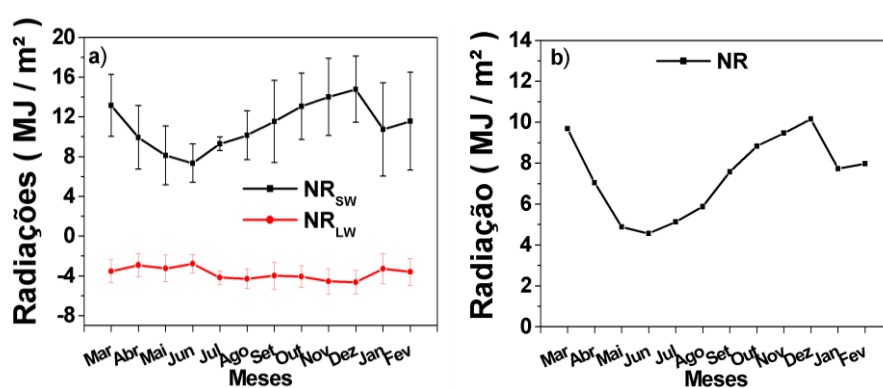


Figura 9 - a) evoluções anuais do Saldo de Radiação de Ondas Curtas e do Saldo de Radiação de Ondas Longas; b) Evolução anual do Saldo de Radiação dentro de estufa no período de 01/03/2008 a 28/03/2009.

Ao contrario NR são menores no período seco, meses de abril a setembro, nos quais a nebulosidade e concentração do vapor de água são menores no ano. No período úmido os valores de NR variaram de 10,2 MJ/m² em dezembro a 9,6 MJ/m² em março, enquanto que no período seco os valores de NR variaram de 4,6 MJ/m² em junho a 7,6 MJ/m² em agosto. No total o valor do NR médio anual foi de 7,4 MJ/m².

4.5 CONCLUSÕES

À partir dos resultados obtidos neste trabalho, concluímos que os valores médios mensais da $SW^{in}\downarrow$ apresentaram sazonalidade, devido à variação astronômica da declinação solar, latitude, e principalmente, as variações climáticas.

A evolução anual das radiações $SW^{in}\downarrow$ e $SW^{in}\uparrow$ segue as variações sazonais de $SW^{ex}\downarrow$ ao longo do ano.: em geral os valores médios mensais das radiações $SW^{in}\downarrow$ e $SW^{in}\uparrow$ são mais elevados no período chuvoso, verão e primavera, e menos elevados, no outono e inverno, no período da seca.

A evolução anual da $LW^{in}_{atm}\downarrow$ e $LW^{in}_{terr}\uparrow$, médias mensais são maiores positivamente e negativamente, respectivamente no período chuvoso, verão e primavera, e menores no outono e inverno, no período da seca. A sazonalidade é devido às variações da temperatura, nebulosidade e vapor d'água, características de cada mês, ou estação do ano.

A evolução anual do Saldo de radiação NR segue a evolução do NR_{SW} e depende das variações climáticas. No total o valor do NR médio anual foi de 7,4 MJ/m².

4.6 REFERÊNCIAS

ASSIS, S.V.; ESCOBEDO, J.F., 1997. Influência do ângulo de elevação solar no Albedo da cultura de alface (*Lactuca sativa* L.) medido em estufa de polietileno tipo túnel e externamente. CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 10, Piracicaba, p.476-478, 1997.

BECKMANN, M. Z. et al, 2006. Radiação solar em ambiente protegido cultivado com tomateiro nas estações verão-outono do Rio Grande do Sul. **Cienc. Rural**, v.36, n.1, p. 86-92, 2006

BOWEN, I. S., 1926. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. **Physical Review**, v. 27, p. 779-787, 1926.

BRUNT, D., Notes on radiation in the atmosphere. **Quart. J. R. Meteorol. Soc.**, v. 58, p. 389-418, 1932.

BURIOL, G. A.; STRECK, N. A.; PETRY, C.; SCHNEIDER, F. M., Transmissividade a radiação solar do polietileno de baixa densidade utilizado em estufas. **Cienc. Rural**, v.25, n.1, p.1-4, 1995.

CARVALHO, L. A. de; TESSARIOLI NETO, J., Produtividade de tomate em ambiente protegido, em função do espaçamento e número de ramos por planta. **Hortic. Bras**, v.23, n.4, p. 986-989, 2005.

CHAVES, M. A.; ESCOBEDO, J. F., A software to process daily solar radiation data. **Renewable Energy**, v. 19, n.1-2, p. 339-344, 2000.

CODATO, G. OLIVEIRA A. P. SOARES J. ESCOBEDO, J. F. GOMES, E. N. PAI, A. D., Global and diffuse solar irradiances in urban and rural areas in southeast Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 93, p. 57-73, 2008.

COSTA, E.; LEAL, P. A. M.; SANTOS, L. C. R. Dos; VIEIRA, L. C. R., Ambientes de cultivo, recipientes e substratos na produção de biomassa foliar e radicular em mudas de maracujazeiro amarelo em Aquidauana - MS. **Ciênc. agrotec**, v.34, n.2, p. 461-467, 2010.

CUNHA, A. R. ; KLOSOWSKI, E. S.; GALVANI, E.; ESCOBEDO, J. F. MARTINS, D., Classificação climática para o município de Botucatu, SP, segundo Köppen. In: I SIMPÓSIO DE ENERGIA NA AGRICULTURA, 1999, Botucatu. Anais. Botucatu, SP: UNESP, Faculdade de Ciências Agrônômicas, 1999. v. 2. p. 487-491, 1999.

CUNHA, A. R. DA; ESCOBEDO, J. F.; KLOSOWSKI, E. S., 2002. Estimativa do fluxo de calor latente pelo balanço de energia em cultivo protegido de pimentão. **Pesq. agropec. bras**, v.37, n.6, p. 735-743. 1994.

CUNHA, A. R. DA; ESCOBEDO, J. F., Alterações micrometeorológicas causadas pelo uso de estufa plástica e seus efeitos no crescimento e produção da cultura de pimentão. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 11, n. 1, p. 15-26, 2003.

ESCOBEDO, J. F.; MELO, J. M. D.; FRISINA, V. A., Radiações Solar Global e Fração da Global Refletida em Estufa Tipo Túnel em Cobertura de Polietileno. In: VII CONGRESSO IBÉRICO DE ENERGIA SOLAR, 1994, Vigo, Espanha. Anais do VII Congresso Ibérico de Energia Solar. Energias Limpas en Progreso, v. 1. p. 53-58, 1994.

ESCOBEDO, J. F.; RODRIGUES, D.; OLIVEIRA, A. P.; SOARES, J., Efeito da cobertura do céu no aumento das frações solar difusa e par-difusa em estufa de polietileno. In: VI CONGRESSO IBÉRICO DE AGRO-ENGENHARIA, 2011, Évora. Anais do VI Congresso Ibérico de Agro-Engenharia, 2011. V.1, 2011.

FARIAS, J. R. B.; BERGAMASCHI, H.; MARTINS, S. R.; BERLATO, M. A., Efeito da cobertura plástica de estufa sobre a radiação solar. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.1, p. 31-36, 1993.

FATNASSI, H., LEYRONAS, C., BOULARD, T., BARDIN, M., NICOT, P., Dependence of greenhouse tunnel ventilation on wind direction and crop height, **Biosystems Engineering**, v. 103, n. 3, p. 338-343, 2009.

FRISINA, V. DE A.; ESCOBEDO, J. F., Radiation and energy balance of lettuce culture inside a polyethylene greenhouse. **Pesq. agropec. bras.**, v.34, n.10, p. 1775-1786, 1999

GALVANI, E.; ESCOBEDO, J. F.; CUNHA, A. R. DA; KLOSOWSKI, E. S., Estimativa do índice de área foliar e da produtividade de pepino em meio protegido - cultivos de inverno e de verão. **Rev. bras. eng. agríc. ambient.**, v.4, n.1, p. 8-13, 2000.

GALVANI, E.; ESCOBEDO, J. F.; PEREIRA, A. B., Balanço de radiação e fluxo de calor no solo em ambiente natural e protegido cultivado com pepineiro. **Bragantia**, v.60, n.2, p. 139-147, 2001.

HELDWEIN, A. B. et al., Plastocrono e rendimento de feijão-de-vagem cultivado sob ambiente protegido e no ambiente externo em semeadura tardia no outono. **Cienc. Rural**, v.40, n.4, p. 768-773, 2010.

HOLCMAN, E.; SENTELHAS, P. C., Microclimate under different shading screens in greenhouses cultivated with bromeliads. **Rev. bras. eng. agríc. ambient.**, v.16, n.8, p. 858-863, 2012.

HUAWEI L., DONG JIANG, B. W., TINGBO DAI, W. C., Effects of shading on morphology, physiology and grain yield of winter wheat. **European Journal of Agronomy**, v. 33, n. 4, p. 267-275, 2010.

INÁCIO, T., Potencial Solar das radiações Global, Difusa e Direta em Botucatu. 390p. Dissertação (Mestrado/ Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu-SP, Brasil, 2009.

KHOSHNEVISAN, B.; RAFIEE, S.; MOUSAZADEH, H., Environmental impact assessment of open field and greenhouse strawberry production. **European Journal of Agronomy**, v. 50, p. 29-37, 2013.

PEREIRA, A. R.; GREEN, S.; VILLA NOVA, N. A., Relationships between single tree canopy and grass net radiations. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 142, n. 1, p. 45-49, 2007.

PEZZOPANE, J. E. M.; PEDRO JUNIOR, M. J.; ORTOLANI, A. A., Modificações microclimáticas provocadas por estufa com cobertura plástica. **Bragantia**, v.54, n.2, p. 419-425, 1995.

PINKER, R.T.; THOMPSON, O.E.; Eck, T.F., The Albedo of a tropical evergreen forest. *Quart. Journal of the Royal Met.Soc*, v. 106, p.551-558, 1980.

POLLET, I. V. AND J. G. PIETERS, Laboratory measurements of PAR transmittance of wet and dry greenhouse cladding materials. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 93, n. 2, p. 149-152, 1999.

RANA, G.; KATERJI, N., Measurement and estimation of actual evapotranspiration in the field under Mediterranean climate: a review. **European Journal of Agronomy**, vol. 13, n. 2–3, p. 125-153, 2000.

SENTELHAS, P. C. et al, 1997. Efeito de diferentes tipos de cobertura em mini-estufas na atenuação da radiação solar e da luminosidade. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, v. 10. Piracicaba-SP, Brasil: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, p. 479-481, 1997.

SOUZA, J. L.; ESCOBEDO, J. F., Balanço de Radiação em Cultivos de Feijão Vagem em Casa de Vegetação com Cobertura de Polietileno e no seu Exterior. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 32, p. 1-15, 1997.

SOUZA, J. W. et al., Efeito do polietileno difusor de luz, sobre a radiação solar global, em ambiente protegido. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 12, p. 211-217, 2004.

SOUZA, P. J. de O. P. et al., Albedo da cultura da soja em área de avanço da fronteira agrícola na Amazônia. **Rev. bras. eng. agríc. ambient.**, v. 14, n. 1, p. 65-73, 2010.

STEIDLE NETO, A. J. et al., Razão entre radiação fotossinteticamente ativa e radiação global no cultivo do tomateiro em casa-de-vegetação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** , v. 12, p. 626-631, 2008.

World Meteorological Organization. Guide on the Global Observing and forecasting System. Geneva, 2008.

5 CAPÍTULO II: PARAMETRIZAÇÃO DE MODELOS CLÁSSICOS DE ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO ATMOSFÉRICA DE ONDAS LONGAS NO INTERIOR DE UMA ESTUFA DE POLIETILENO PARA BOTUCATU-SP

5.1 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 13 modelos da literatura 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.

5.2 INTRODUÇÃO

A radiação de ondas longas atmosféricas (no inglês downward *long-wave* $LW\downarrow$) 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 de Energia, pois o conhecimento de sua magnitude permite a racionalização do uso energético.

As estufas de polietileno propiciam a 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).

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 ajustar 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.

5.3 MATERIAIS 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°53'09"S; 48°26'42"W e altitude média 786m) é um município brasileiro localizado na região centro-oeste do Estado de São Paulo (Figura 1), possui área total de 1.482,642 km² e população estimada em 2015 de aproximada de 127.308 mil habitantes (IBGE, 2015). 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- Mapa mostrando a localização do município de Botucatu no estado de São Paulo.

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 ($23,216 \pm 1,20^{\circ}\text{C}$), o mais frio julho ($17,16 \pm 1,33^{\circ}\text{C}$) e a temperatura do ar média anual de $20,46 \pm 2,21^{\circ}\text{C}$ (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.

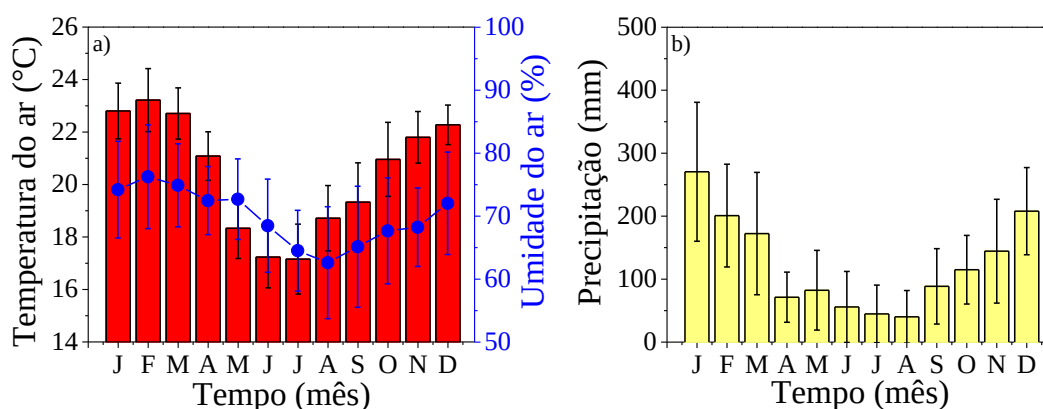


Figura 2- Séries climáticas de a) temperatura e umidade b) precipitação no período de 1971 a 2009.

A Figura 3 mostra uma fotografia da estufa utilizada no trabalho. Área de 168m^2 , tipo túnel alto, com cobertura de polietileno ($100\mu\text{m}$). Suas dimensões: 24m de comprimento, 7m de largura, 2m de pé direito e 1,7 m de altura da concavidade.



Figura 3- Estufa vista de fora

Para a medida do saldo de radiação foi utilizado um saldo-radiômetro modelo CNR1 *Net Radiometer* da marca *Kipp & Zonen*®. 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 CNR1 *Net Radiometer*.

A irradiância $ILW\downarrow$ 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 $ILW\downarrow$ 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. Alguns modelos utilizam a água precipitável w em sua equação. Este valor w é $w = 46,5 \cdot ea / Tar$.

Tabela 1 - Equações de alguns modelos de estimativa de $ILW\downarrow$ clássicos, com sua respectiva numeração para este trabalho, autores e ano da publicação.

Autor(es)	Coef. Originais
1 - Ångström 1918	A= 0,82
$I_{LW} \downarrow = [A - (B * 10^{-C * ea})] * \sigma * T^4$	B= 0,25
	C= 0,168
2 - Brunt 1932	A= 0,52
$I_{LW} \downarrow = [A + (B * \sqrt{ea})] * \sigma * T^4$	B= 0,065
3 - Anderson 1954	A= 0,68
$I_{LW} \downarrow = [A + (B * \sqrt{10 * ea})] * \sigma * T^4$	B= 0,036
4 - Swinbank 1963	A= $9,2 * 10^{-6}$
$I_{LW} \downarrow = (A * T^2) * \sigma * T^4$	
5 - Idso & Jackson 1969	A= 0,261
$I_{LW} \downarrow = \{1 - A * \exp[B * (273 - T)^2]\} * \sigma * T^4$	B= -0,0007
6 - Brutsaert 1975	A= 1,24
$I_{LW} \downarrow = \left[A * \left(\frac{ea}{T} \right)^{\frac{1}{7}} \right] * \sigma * T^4$	
7 - Satterlund 1979	A= 1,08
$I_{LW} \downarrow = \left\{ A * \left[1 - \exp \left(-ea^{\frac{T}{B}} \right) \right] \right\} * \sigma * T^4$	B= 2016
8 - Idso 1981	A= 0,7
$I_{LW} \downarrow = A + \left[B * ea * \exp \left(\frac{1500}{T} \right) \right] * \sigma * T^4$	B= 0,000595
9 - Prata 1996	A= 1,2
$I_{LW} \downarrow = 1 - (1 + w) * \exp \left[- (A + B * w)^{0,5} \right] * \sigma * T^4$	B= 3,0

10 - Dilley & O'Brian 1998	
$I_{LW} \downarrow = A + \left[B * \left(\frac{T}{273,16} \right)^6 \right] + \left(C * \sqrt{18,6 * \frac{w}{25}} \right)$	A= 59,38
	B= 113,7
	C= 96,96

11 - Crawford & Duchon 1999	
$I_{LW} \downarrow = A + \left\{ B * \left[\text{sen} (m + 2) * \left(\frac{\pi}{6} \right) \right] * \left(\frac{ea}{T} \right)^{\frac{1}{7}} \right\} * \sigma * T^4$	A= 1,22
	B= 0,06

12 - Niemälä 2001	
$I_{LW} \downarrow = \{ A + [B * (ea - 2)] \} * \sigma * T^4$	A= 0,72
	B= 0,009

13 - Iziomon et al., 2003	
$I_{LW} \downarrow = \left\{ 1 - \left[A * \exp \left(\frac{-B * ea}{T} \right) \right] \right\} * \sigma * T^4$	A= 0,35
	B= 10,0

Nos dados utilizados para o ajuste dos parâmetros foram usados apenas horas de céu limpo em dias de céu limpo, similarmente aos trabalhos envolvendo os modelos clássicos, e com os valores trabalhados na partição horária e na unidade W/m².

Para a modelagem e manipulação do banco de dados, foi utilizado o software Microcal Origin, que têm a capacidade de realizar as regressões não lineares utilizadas neste trabalho para a modelagem das equações clássicas de estimativa da radiação de ondas longas atmosférica.

5.4 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.

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

Autor(es)	Coef. Ajustados	R^2
1 - Ångström 1918	A= 1,02	
$I_{LW} \downarrow = [A - (B * 10^{-C * ea})] * \sigma * T^4$	B= 0,24 C= 0,213	0.94316
2 - Brunt 1932	A= 0,81	0.94013
$I_{LW} \downarrow = [A + (B * \sqrt{ea})] * \sigma * T^4$	B= 0,087	

3 - Anderson 1954	A= 0,81	0.94013
$I_{LW} \downarrow = [A + (B * \sqrt{10 * ea})] * \sigma * T^4$	B= 0,027	
5 - Idso & Jackson 1969	A= 0,003*10 ⁻²	0.77269
$I_{LW} \downarrow = \{1 - A * \exp[B * (273 - T)^2]\} * \sigma * T^4$	B= 7,6075*10 ⁻⁸	
6 - Brutsaert 1975	A= 1,30	0.92586
$I_{LW} \downarrow = \left[A * \left(\frac{ea}{T} \right)^{\frac{1}{7}} \right] * \sigma * T^4$		
7 - Satterlund 1979	A= 0,25	0.93805
$I_{LW} \downarrow = \left\{ A * \left[1 - \exp \left(-ea^{\frac{T}{B}} \right) \right] \right\} * \sigma * T^4$	B= 423	
8 - Idso 1981	A= 0,7	0.93431
$I_{LW} \downarrow = A + \left[B * ea * \exp \left(\frac{1500}{T} \right) \right] * \sigma * T^4$	B= 0,000445	
10 - Dilley & O'Brian 1998	A= -886,55	0.93055
$I_{LW} \downarrow = A + \left[B * \left(\frac{T}{273,16} \right)^6 \right] + \left(C * \sqrt{18,6 * \frac{w}{25}} \right)$	B= 25360758.3 C= 637,29	
12 - Niemälä 2001	A= 0,94	0.93691
$I_{LW} \downarrow = \{A + [B * (ea - 2)]\} * \sigma * T^4$	B= 0,023	
13 - Iziomon et al., 2003	A= -3,84*10 ⁻⁹	0.77269
$I_{LW} \downarrow = \left\{ 1 - \left[A * \exp \left(\frac{-B * ea}{T} \right) \right] \right\} * \sigma * T^4$	B= -1,1*10 ⁻⁷	

Os modelos com melhor ajuste de parâmetro foram os modelos de Ångström (1918), Brunt (1932) e Anderson (1954) com R² 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^2 acima de 0,9 enquanto que os modelos 5 e 13 apresentaram R^2 próximos de 0,7.

A diferença relativa encontrada entre os valores dos parâmetros variou de -3,57% até valores extremamente afastados dos parâmetros originais. Para se entender essa diferença relativa é necessário se conhecer as peculiaridades de cada modelo, principalmente quanto à sua concepção. Alguns modelos clássicos são chamados “modelos físicos”, onde parâmetros físicos do ambiente são utilizados na equação do modelo como explicação da $ILW\downarrow$. Alguns modelos são chamados “modelos empíricos”, modelos que não se baseiam em leis físicas na explanação de $ILW\downarrow$, mas sim dados experimentais, forçando a equação a se ajustar a dados medidos. Isto faz com que cada parâmetro não represente a mesma grandeza entre modelos diferentes. Um exemplo disto é o parâmetro B, que em Brunt, 1932, expressa o peso da pressão de vapor no modelo, enquanto que em Idso & Jackson, 1969 o parâmetro B pondera o efeito da temperatura do ar, e em alguns modelos é difícil separar um parâmetro por elemento climático utilizado na equação. A diferença nos parâmetros ajustados em relação aos parâmetros originais espelha o efeito climático local e o quanto estes parâmetros locais diferiram dos locais originais de concepção dos modelos clássicos utilizados neste trabalho.

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

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

* Diferença relativa: $((\text{Parâmetro ajustado} - \text{Parâmetro original}) / \text{Parâmetro original}) * 100$

5.5 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.

5.6 REFERÊNCIAS

ÅNGSTRÖM, A. A study of the radiation of the atmosphere. **Smithson. Misc. Collect**, 65, 1-159, 1918.

BLONQUIST JR, J. M., TANNER, B.D., BUGBEE B., Evaluation of measurement accuracy and comparison of two new and three traditional net radiometers. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 149, pp. 1709-1721, 2009.

BRUNT, D., Notes on radiation in the atmosphere. **Quart. J. R. Meteorological Society**. v. 58, pp. 389–418, 1932.

CARVALHO, L. A. DE Y TESSARIOLI NETO, J., Produtividade de tomate em ambiente protegido, em função do espaçamento e número de ramos por planta. **Horticultura Brasileira**, v. 23, n. 4, pp. 986-989, 2005.

CUNHA, A. R. DA Y ESCOBEDO, J. F., Alterações micrometeorológicas causadas pelo uso de estufa plástica e seus efeitos no crescimento e produção da cultura de pimentão. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 11, n. 1, pp. 15-26, 2003.

ESCOBEDO, J. F.; GOMES, E. N.; OLIVEIRA, A. P.; SOARES, J., Ratios of UV, PAR and NIR components to global solar radiation measured at Botucatu site in Brazil. **Renewable Energy**, v. 36, pp. 169-178, 2011.

GALVANI, E.; ESCOBEDO, J. F.; CUNHA, A. R. DA; KLOSOWSKI, E. S., 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**, v. 4, n. 1, pp. 8-13, 2000.

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., Plastocrono e rendimento de feijão-de-vagem cultivado sob ambiente protegido e no ambiente externo em semeadura tardia no outono. **Ciencia Rural**, v. 40, n. 4, pp. 768-773, 2010.

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., Environmental impact assessment of open field and greenhouse strawberry production. N, v. 50, pp. 29-37, 2013.

SOUZA, J. L. Y ESCOBEDO, J. F., Balanço de Radiação em Cultivos de Feijão Vagem em Casa de Vegetação com Cobertura de Polietileno e no seu Exterior. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 32, pp. 1-15, 1997.