

**REGIANE SLONGO FAGUNDES**

**“COMPORTAMENTO E MODELAGEM DA RADIAÇÃO SOLAR  
FOTOSSINTETICAMENTE ATIVA PARA A REGIÃO DE SANTA  
HELENA-PR”**

**CASCADEL - Paraná - Brasil**

**JULHO– 2006**

**REGIANE SLONGO FAGUNDES**

**“COMPORTAMENTO E MODELAGEM DA RADIAÇÃO SOLAR  
FOTOSSINTETICAMENTE ATIVA PARA A REGIÃO DE SANTA  
HELENA-PR”**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola, área de concentração **Engenharia de Sistemas Agroindustriais**.

**Orientador:** Prof<sup>o</sup>. Dr. Reinaldo Prandini Ricieri

**CASCADEL - Paraná – Brasil**

**JULHO – 2006**

**REGIANE SLONGO FAGUNDES**

**“COMPORTAMENTO E MODELAGEM DA RADIAÇÃO SOLAR  
FOTOSSINTETICAMENTE ATIVA PARA A REGIÃO DE SANTA  
HELENA-PR”**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola, área de concentração Engenharia de Sistemas Agroindustriais, **aprovada** pela seguinte banca examinadora:

Orientador: Prof. Dr. Reinaldo Prandini Ricieri  
UNIOESTE/CCET – Cascavel - PR

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Simone Mari Trento  
PUC – Toledo - PR

Prof. Dr. Reginaldo Ferreira Santos  
UNIOESTE/CCET – Cascavel - PR

Prof. Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza  
UNIOESTE/CCET – Cascavel - PR

Cascavel, 07 julho de 2006.

**Ao meu marido Jaderson, que esteve ao meu lado em todos os momentos, demonstrando seu amor incondicional.**

**Aos meus familiares, pela paciência e apoio.**

**Aos meus pais, que sempre foram inspiração, mostrando que jamais devemos desistir.**

## AGRADECIMENTOS

A Deus, que esteve sempre presente, permitindo chegar até aqui.

Ao professor orientador Dr. Reinaldo Prandini Ricieri pela oportunidade e pelos ensinamentos.

Aos professores, que sempre se mostraram prestativos e acessíveis nos momentos de dúvidas.

À prefeitura Municipal de Santa Helena pelo apoio na montagem da estação e execução da pesquisa.

A Silvana Quallio, (acadêmica do curso de Ciências Biológicas da UNIOESTE, campus de Santa Helena) que colaborou imensamente na fase de montagem e coleta dos dados.

Aos meus colegas de curso pelo companheirismo e amizade, em especial a Patrícia Drecher, que compartilhou suas horas de estudos e seus conhecimentos.

A minha prima Larissa Toscan Campos que auxiliou na tradução dos artigos.

A todos os meus amigos, pela amizade, força, companheirismo e incentivo e em especial a Alessandra Stadler Favaro Misiak.

## SUMÁRIO

	<i>página</i>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	vi
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	vii
<b>LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS</b> .....	ix
<b>RESUMO</b> .....	x
<b>SUMMARY</b> .....	xi
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	3
2.1 RADIÇÃO SOLAR .....	3
2.2 RADIAÇÃO FOTOSSINTETICAMENTE ATIVA – PAR .....	4
2.3 MÉTODOS DE MEDIDA E INSTRUMENTAÇÃO DA PAR ...	5
2.4 CARACTERÍSTICAS ESPECTRAIS E FATORES DE CONVERSÃO DA PAR .....	7
2.5 ESTIMATIVA DA PAR.....	8
2.5.1 Estimativa da PAR em Função do Tipo de Cobertura do Céu.....	10
2.6 A PAR E O SISTEMA VEGETATIVO .....	13
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	16
3.1 LOCALIZAÇÃO DO EXPERIMENTO .....	16
3.2 INSTRUMENTOS DE MEDIDAS .....	16
3.3 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS .....	17
3.4 PARTIÇÃO DA BASE DE DADOS .....	17
3.5 PROCESSAMENTO DOS DADOS .....	19
3.6 EQUAÇÕES UTILIZADAS PARA ESTIMAR A RADIAÇÃO NO TOPO DA ATMOSFERA ( $R_0$ ) .....	20
3.6.1 Índice de Claridade .....	21
3.7 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS MODELOS .....	21
3.8 ÍNDICES ESTATÍSTICOS EMPREGADOS .....	22
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	25
4.1 COMPORTAMENTO DA RADIAÇÃO SOLAR NA REGIÃO DE SANTA HELENA .....	25
4.1.1 Irradiações Diárias .....	25
4.1.2 Irradiações Médias Mensais .....	26
4.1.3 Irradiações Diárias Mensais Acumuladas .....	27
4.1.4 Irradiações Horárias Para Solstício de Inverno .....	29
4.1.5 Irradiações Horárias Para o Solstício de Verão .....	30
4.1.6 Índice de Claridade $K_t$ .....	31
4.2 EQUAÇÕES ENCONTRADAS .....	32
4.2.1 Modelo Para Partição Anual .....	32
4.2.2 Modelo Para Partição Sazonal .....	35
4.2.3 Modelo Para Partição Mensal .....	37
4.2.4 Modelo em Função do Tipo de Cobertura do Céu .....	40
4.3 VALIDAÇÃO DO MODELO .....	43
4.3.1 Partição Anual .....	43

4.3.2	Partição Sazonal .....	44
4.3.3	Partição Mensal .....	47
4.3.4	PAR em Função do Tipo de Cobertura do Céu .....	52
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>56</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>57</b>

## LISTA DE TABELAS

		<i>página</i>
<b>Tabela 1</b>	Equação após teste de significância, média dos percentuais individuais e percentual da somatória para o modelo I .....	34
<b>Tabela 2</b>	Equação após teste de significância, média dos percentuais individuais e percentual da somatória para o modelo II.....	37
<b>Tabela 3</b>	Equação após teste de significância, média dos percentuais individuais e percentual da somatória para o modelo III .....	39
<b>Tabela 4</b>	Equação após teste de significância, média dos percentuais individuais e percentual da somatória para o modelo IV .....	42
<b>Tabela 5</b>	Média dos valores reais ( $R_{PARmed}$ ) e estimados ( $R_{PARest}$ ) da irradiação PAR, média dos erros $ \Delta (\%)$ , desvio padrão médio residual ( $St$ ) e índice de correlação ( $R$ ), para partição anual .....	43
<b>Tabela 6</b>	Média dos valores reais ( $R_{PARmed}$ ) e estimados ( $R_{PARest}$ ) da irradiação PAR, média dos erros $ \Delta (\%)$ , desvio padrão médio residual ( $St$ ) e índice de correlação ( $R$ ), para partição sazonal .....	45
<b>Tabela 7</b>	Média dos valores reais ( $R_{PARmed}$ ) e estimados ( $R_{PARest}$ ) da irradiação PAR, média dos erros $ \Delta (\%)$ , desvio padrão médio residual ( $St$ ) e índice de correlação ( $R$ ), para partição mensal .....	48
<b>Tabela 8</b>	Média dos valores reais ( $R_{PARmed}$ ) e estimados ( $R_{PARest}$ ) da irradiação PAR, média dos erros $ \Delta (\%)$ , desvio padrão médio residual ( $St$ ) e índice de correlação ( $R$ ), para o tipo de cobertura do céu .....	53



## LISTA DE FIGURAS

	<i>página</i>
<b>Figura 1</b>	Piranômetro Kipp & Zonen - modelo CM3 ..... 16
<b>Figura 2</b>	Datalogger da CAMPBELL SCIENTIFIC - INC modelo CR10X, com micrologger ..... 17
<b>Figura 3</b>	Densidade de fluxo da irradiância global ( $I_{glo}$ ) e PAR global ( $I_{PAR}$ ) ilustrando a partição instantânea para o dia 12/01/2004 ..... 19
<b>Figura 4</b>	Médias diárias de irradiação solar no topo da atmosfera, global e PAR para o período de 23/09/2003 a 31/12/2003 (1 a 100) e de 01/01/2004 a 22/09/2004 (101 a 366) ..... 26
<b>Figura 5</b>	Irradiações médias mensais no topo da atmosfera, global e PAR para o período de 23 de setembro de 2003 a 22 de setembro de 2004 ..... 27
<b>Figura 6</b>	Irradiações diárias mensais acumuladas no topo da atmosfera, global e PAR para o período de 23 de setembro de 2003 a 22 de setembro de 2004 ..... 28
<b>Figura 7</b>	Irradiações horárias para o solstício de inverno (21/06/2004), no topo da atmosfera, global e PAR ..... 29
<b>Figura 8</b>	Irradiações horárias para o solstício de verão (22/12/2003), no topo da atmosfera, global e PAR ..... 30
<b>Figura 9</b>	Médias diárias do índice de claridade ( $k_t$ ) para o período de setembro de 2003 a setembro de 2004 ..... 32
<b>Figura 10</b>	Curva de regressão linear simples, com partição anual, para estimativa da irradiação PAR em função da radiação global em MJ/m <sup>2</sup> ..... 33
<b>Figura 11</b>	Curva de regressão linear simples, para estimativa da irradiação PAR em função da irradiação global em MJ/m <sup>2</sup> para a primavera ..... 35
<b>Figura 12</b>	Curva de regressão linear simples, para estimativa da irradiação PAR em função da irradiação global em MJ/m <sup>2</sup> para o mês de janeiro ..... 38
<b>Figura 13</b>	Curva de regressão linear simples, com céu nublado, para estimativa da irradiação PAR em função da irradiação global, em MJ/m <sup>2</sup> ..... 41
<b>Figura 14</b>	(a) Correlação entre as componentes da irradiação PAR medida e estimada pela equação de regressão; (b) Distribuição de freqüência dos erros médios diários. Período de validação do modelo I, ..... 44
<b>Figura 15</b>	Correlação entre as componentes da irradiação PAR medida e estimada pela equação de regressão e a freqüência de ocorrência de desvios para o modelo na primavera (a) e (b); verão (c) e (d); outono (e) e (f) e inverno (g) e (h). Período de validação do modelo II..... 46

- Figura 16** Correlação entre as componentes da irradiação PAR medida e estimada pela equação e a frequência de ocorrência de desvios de regressão dos meses de: janeiro **(a)** e **(b)**; fevereiro **(c)** e **(d)**; março **(e)** e **(f)**; abril **(g)** e **(h)**, maio **(i)** e **(j)**; junho **(k)** e **(l)**; julho **(m)** e **(n)**; agosto **(o)** e **(p)**; setembro **(q)** e **(r)**; outubro **(s)** e **(t)**; novembro **(u)** e **(v)**; dezembro **(x)** e **(z)**. Período de validação do modelo III. .... 49
- Figura 17** Correlação entre as componentes da radiação PAR medida e estimada pela equação de regressão e a frequência de ocorrência de desvios para o modelo com céu nublado **(a)** e **(b)**, parcialmente nublado **(c)** e **(d)**; limpo **(e)** e **(f)**. Período de validação do modelo IV..... 54

## LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

<b>DJ</b>	=	Dia Juliano
<b><math>E_o</math></b>	=	Fator de correção da excentricidade da órbita terrestre
<b><math>I_{glo}</math></b>	=	Irradiância solar global ( $W/m^2$ )
<b><math>I_{PAR}</math></b>	=	Irradiância solar PAR ( $W/m^2$ )
<b>IV</b>	=	Infravermelho
<b>J</b>	=	Joule
<b><math>k_t</math></b>	=	Índice de claridade (adimensional)
<b>m</b>	=	Metro (unidade de comprimento)
<b><math>m^2</math></b>	=	Metro quadrado (unidade de área)
<b>MJ</b>	=	Mega Joule (Joule * $10^6$ )
<b>PAR</b>	=	Photosynthetically Active Radiation
<b>R</b>	=	Coefficiente de correlação
<b><math>R^2</math></b>	=	Coefficiente de determinação
<b><math>R_{glo}</math></b>	=	Irradiação solar global ( $MJ/m^2$ )
<b><math>R_o</math></b>	=	Irradiação solar no topo da atmosfera ( $MJ/m^2$ )
<b><math>R_{PAR}</math></b>	=	Irradiação solar PAR ( $MJ/m^2$ )
<b><math>R_{PARest}</math></b>	=	Irradiação solar PAR estimada ( $MJ/m^2$ )
<b><math>R_{PARmed}</math></b>	=	Irradiação solar PAR medida ( $MJ/m^2$ )
<b>s</b>	=	Segundo (unidade de tempo)
<b>S</b>	=	Sul (latitude)
<b>SQR</b>	=	Soma do quadrado da regressão
<b>SQT</b>	=	Soma do quadrado total
<b>St</b>	=	Desvio padrão residual
<b>UV</b>	=	Ultravioleta
<b>W</b>	=	Watt
<b>W-GR</b>	=	Oeste com referência ao meridiano de Greenwich (longitude)
<b>Y</b>	=	Irradiância
<b><math>\alpha</math></b>	=	Coefficiente angular
<b><math>\beta</math></b>	=	Coefficiente linear
<b><math>W_s</math></b>	=	Ângulo solar (graus)
<b><math>\delta</math></b>	=	Declinação solar (graus)
<b><math>\Phi</math></b>	=	Latitude local (graus)
<b><math>\mu m</math></b>	=	Micrometros
<b><math>\Delta(\%)</math></b>	=	Erro médio diário
<b><math>\Delta(s)</math></b>	=	Percentual da somatória (adimensional)
<b><math>\Delta(i)</math></b>	=	Média dos percentuais individuais (adimensional)

## RESUMO

O presente estudo caracteriza o comportamento e a modelagem da irradiação solar global fotossinteticamente ativa (PAR), obtidas por meio de regressão linear simples, com partição anual, sazonal, mensal e tipo de cobertura do céu para a região de Santa Helena (latitude de 24°51'S, longitude de 54°19'W-GR e altitude de 258m). O experimento foi conduzido na estação meteorológica experimental Campus da UNIOESTE -Universidade Estadual do Oeste do Paraná-, instalada no município de Santa Helena/PR durante o período de 01 de agosto de 2003 a 30 de maio de 2005. As medidas de irradiação solar global foram obtidas por um piranômetro da Kipp & Zonen - modelo CM3 e da irradiação solar global fotossinteticamente ativa (PAR) por um sensor quântico da marca LI-COR. Dessa série de dados foram separados para a geração dos modelos as medidas equivalentes ao período de 23/09/03 a 22/09/04 e o restante para a validação. O máximo de irradiação solar global ( $R_{\text{glo}}$ ) incidente na superfície da Terra correspondeu a 59,9% da incidente no topo da atmosfera e para a irradiação PAR ( $R_{\text{PAR}}$ ) 21,73%. O valor máximo e mínimo para a média mensal da  $R_{\text{glo}}$  ocorreu no mês de janeiro e junho e para componente  $R_{\text{PAR}}$  no mês de fevereiro e junho, respectivamente. O índice de claridade variou entre 0,01 a 0,83 com média de 0,58. Os coeficientes lineares dos modelos apresentaram uma variação de 0,28 a 0,45. Os erros médios dos modelos foram: de 3,35% para a partição anual; de 1,41% a 15,95% para a partição sazonal; de 1,35% a 7,74% para a partição mensal e de 2,62% a 6,73% para o tipo de cobertura do céu. Não existe diferença significativa para partição do modelo sazonal e anual. O modelo mais eficaz foi encontrado com a partição em função do tipo de cobertura do céu, onde os coeficientes angulares das equações diferiram em menos de 2,5% das médias percentuais individuais e percentual da somatória, com dispersão de 3,84% para o erro médio.

**PALAVRAS CHAVES:** Irradiação solar fotossinteticamente ativa, partição, modelagem.

## SUMMARY

This current study typifies photosynthetically active, global solar radiation behavior and modeling (PAR) obtained through simple linear regression with annual, seasonal, monthly partition and type of sky cast for the region of Santa Helena, Paraná, Brasil (latitude of 24°51'S, longitude of 54°19'W-GR and altitude of 258m). The experiment was conducted at UNIOESTE's (Universidade Estadual do Oeste do Paraná) Agro-meteorological Experimental Station based in the city of Santa Helena, Paraná from August 1<sup>st</sup>, 2003 and May 30<sup>th</sup>, 2005. Global solar irradiation measures were obtained by a Kipp & Zonen pyranometer (model CM3) and photosynthetically active, global solar radiation (PAR) by a LI-COR quantic sensor. From this series of data, were measurements corresponding to the peoriod starting Sept-23-2003 to Sept-22-2004 were separated to generate the modais and remainder validation. Maximum surface global solar radiation incident ( $R_{glo}$ ) corresponded to 59.9% of the incident in the atmosphere, and for PAR radiation ( $R_{PAR}$ ) the equivalent to 21.73%. The highest and howest monthly average value for  $R_{glo}$  occurred in January and June and for the  $R_{PAR}$  component in February and June, respectively. Clarity index varied from 0.01 to 0.83, with an average of 0.58. Modal linear coefficients showed a variation from 0.28 to 0.44. Modal average errors were as follows: 3.35% to the annual partition; from 1.41% to 15.95% for the seasonal partition; 1.35% to 7.74% for the monthly partition; and 2.62% to 6.73% for the type of skycast. There is no significant difference for the annual and seasonal modal partition. The most efficient modal was seen in the type with-of-sky cast partition where angular coefficients of the equations differ in less than 2.5% from individual percentage measurements and the sum percentage with dispersion of 3.84% for average error.

**Key-words:** photosynthetically active, Global solar radiation, Modeling, Partition



## 1 INTRODUÇÃO

A radiação solar, ao se propagar na atmosfera, passa pelos processos de espalhamento e absorção, fazendo com que apenas uma fração da radiação incidente no topo da atmosfera incida sobre a superfície da terra. Essa, por sua vez, é constituída das componentes direta e difusa, sendo a soma das duas, denominada radiação solar global.

Uma das faixas da radiação solar global de grande interesse às ciências biológicas e agrônomicas é a fotossinteticamente ativa (PAR), pertencente ao comprimento de onda que vai de  $0,4 \mu m$  a  $0,7 \mu m$  (McCREE, 1972). Parte dessa radiação é fonte primária de energia na fotossíntese, pois excita as moléculas de clorofila, iniciando processo químico que ocorre nos cloroplastos, o que resulta na liberação de oxigênio molecular e na captura de dióxido de carbono da atmosfera, que é utilizado para sintetizar carboidratos.

Sua absorção pelas plantas se dá através da pigmentação. Plantas clorofiladas **a** e **b**, por exemplo, compreendem os comprimentos de ondas de maior absorção na banda da faixa azul, indo de  $0,35$  a  $0,45 \mu m$ , e da faixa do laranja ao vermelho entre  $0,6$  a  $0,7 \mu m$ . Já as carotenóides têm espectros de absorção de luz na região da faixa verde entre  $0,40 \mu m$  a  $0,55 \mu m$ .

Apesar da grande importância da PAR para as áreas biológicas e agrônomicas, encontram-se poucos trabalhos na literatura brasileira, pois a maior parte das estações meteorológicas do país não dispõem de medidas desta componente da irradiação solar, devido ao alto custo dos sensores e da necessidade freqüente de recalibrações.

Já a radiação global há muito tempo está sendo estudada. Pesquisadores como MARTINEZ-LOSANO et al. (1984), que cobre quase todo território brasileiro, RICIEIRI et al. (1998) para Botucatu/SP e Cascavel/PR, VALIATI (2001) para região de Cascavel. Esses pesquisadores utilizaram modelos de estimativas das componentes da radiação solar, através do modelo de ANGSTROM (1924), modificados por PRESCOTT(1940), que relaciona a

radiação solar incidente no topo da atmosfera, obtida por meio do uso de equações, como a razão de insolação.

Embora as informações das componentes da radiação solar tenham características diferentes, elas partem da mesma fonte. Essa informação é importante, pois possibilita encontrar um modelo matemático para a irradiação fotossinteticamente ativa, em função dos dados da irradiação solar global, que viabiliza estudos referentes à variação ou dependência de fatores ambientais e atmosféricos da PAR. Além disso, contribui para pesquisadores e agricultores otimizarem seu sistema tecnológico em nível de produção como na utilização racional da água, na utilização de iluminação artificial, na seleção de planta, no melhoramento genético, entre outros em regiões agrícolas como Santa Helena/PR.

Objetiva-se então, nesse trabalho, analisar o comportamento da radiação solar na região de Santa Helena/PR e desenvolver modelos para se estimar a radiação fotossinteticamente ativa (PAR), utilizando-se de diferentes partições (anual, sazonal, mensal e tipo de cobertura do céu) dos dados coletados da irradiação solar global e PAR.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 RADIAÇÃO SOLAR

A radiação solar é um dos principais elementos meteorológicos que interfere na temperatura, pressão, vento, precipitação, umidade etc., além de ser a fonte primária de energia para a maioria dos processos terrestres, desde a fotossíntese, responsável pela produção vegetal e manutenção da vida na presente forma, até a circulação geral da atmosfera e oceanos.

Ao incidir no topo da atmosfera, a radiação solar se propaga até atingir a superfície da Terra, passando durante este percurso pelos processos de espalhamento e absorção. Esses fenômenos não são suficientes para reter todo o espectro da radiação solar e, portanto, grande parte atravessa a atmosfera alcançando diretamente a superfície do solo.

A parcela que interage com a atmosfera, decorrente do processo de difusão (espalhamento), é chamada de radiação solar difusa e a parcela que não interage, alcançando diretamente a superfície do solo, é chamada de radiação solar direta. A soma dessas componentes é chamada de radiação solar global e elas são responsáveis pela radiação que chega à superfície da Terra ser de, aproximadamente, 51% radiação incidente no topo da atmosfera (OMETTO, 1981).

Essa radiação compreende parte do ultravioleta (UV) do espectro, com comprimento de onda entre 0,3 e 0,38  $\mu m$ ; espectro visível, com comprimento de onda entre 0,38 e 0,72  $\mu m$ , contendo nesta faixa a radiação denominada fotossinteticamente ativa (PAR); e parte infravermelha (IV), com comprimento de onda entre 0,72 e 4  $\mu m$ .

A proporção de cada componente e a composição da radiação global incidente dependem das condições atmosféricas do momento. Os tipos de cobertura do céu (nublado, parcialmente nublado e limpo) são caracterizados como um dos fatores de maior influência no aspecto qualitativo da energia,

variando de acordo com o tipo de nuvem (cumulus, stratus e cirrus), presença de aerossóis, etc.

RICIERI (1998) utilizando-se de medidas feitas na Estação de Radiometria Solar, em Botucatu, em um dia de céu quase que completamente limpo (28/07/97), constatou que a radiação direta representou quase que a totalidade da radiação solar global naquele dia. Essa situação se modifica significativamente durante um dia nublado (24/08/97), quando a contribuição da radiação difusa durante o dia chegou a 60% da radiação global.

## 2.2 RADIAÇÃO FOTOSSINTETICAMENTE ATIVA - PAR

A radiação fotossinteticamente ativa conhecida como PAR - *Photosynthetically Active Radiation* – passa pela atmosfera praticamente sem sofrer redução por absorção em sua quantidade sendo esta a maior componente da radiação solar global incidente, podendo chegar a, aproximadamente, 50% de todo o espectro (PEREIRA, ANGELOCI & SENTELHAS, 2002). Essa por sua vez desempenha papel fundamental no desenvolvimento da planta, pois auxilia na atividade fotossintética.

Até a metade da década de sessenta, a radiação fotossinteticamente ativa (PAR) era mais comumente referida como uma fração constante da radiação solar global, pouco afetada pelas condições atmosféricas e do céu (McCREE, 1966; MONTEITH, 1972; SZEICZ, 1974; BRITTON & DODD, 1976; STANHILL & FUCHS, 1977).

A partir de então, inúmeros pesquisadores, estudando a radiação solar PAR começaram a detectar variações de seu percentual em relação à radiação solar global (PAR/global), inicialmente, em função da estação do ano. Estes trabalhos aumentaram o estudo da PAR e a busca de outros fatores que interferiam nesse percentual como a elevação solar, as condições de cobertura do céu, a pressão atmosférica, a turbidez atmosférica e o conteúdo de água precipitável.

## 2.3 MÉTODOS DE MEDIDA E INSTRUMENTAÇÃO DA PAR

Várias são as definições para a faixa que compreende o comprimento de onda PAR encontrados na literatura, devido principalmente a características peculiares dos diferentes métodos de medida adotados. Muitos pesquisadores, no sentido de buscar uma melhor definição para a PAR, sugeriram algumas definições para limites de energia.

Gabrielsen (1940) citado por McCREE (1973) sugeriu, originalmente, como definição para a PAR, como sendo a faixa espectral do visível com comprimentos de onda entre 0,40  $\mu\text{m}$  e 0,70  $\mu\text{m}$ , já GAASTRA (1959) definiu a PAR como radiação de faixa espectral entre 0,38  $\mu\text{m}$  0,71  $\mu\text{m}$ , HOWELL & MEEK (1983) e KARALIS (1989) na faixa de 0,40  $\mu\text{m}$  e 0,63  $\mu\text{m}$ .

McCREE (1972) testou várias definições da PAR utilizando dados de fotossíntese e sugeriu que a definição usual de energia total na faixa espectral de 0,4 a 0,7 $\mu\text{m}$  era a mais precisa. Essa definição tem sido a mais utilizada e citada por pesquisadores principalmente dos países ocidentais.

Grande parte dos trabalhos desenvolvidos nesta área utilizou dois principais métodos de obtenção da PAR, classificados de direto ou indireto. Os mesmos visavam um estudo aprofundado das diferentes definições dos limites de comprimento de onda da PAR, por meio de várias configurações experimentais, envolvendo diversos tipos de piranômetros, métodos de calibração e faixas espectrais.

Através do método indireto (STANHILL & FUCHS, 1977; STIGER & MUSABILHA, 1982; BLACKBURN & PROCTOR, 1983; RAO, 1984; KARALIS, 1989; PAPAIOANNOU et al., 1993) a PAR é obtida da diferença entre duas medidas de irradiância correspondentes, geralmente entre o comprimento de onda de 0,285 a 2,700  $\mu\text{m}$  e 0,695 a 2,700  $\mu\text{m}$ . Nesse caso, são utilizados três instrumentos, um piranômetro para medir a radiação global, um piranômetro equipado com um filtro específico para a faixa do infravermelho (filtro RG-695, por exemplo) e um detector de radiação ultravioleta.

Pelo método direto (STANHILL & FUCHS, 1977; ALADOS et al., 1996; ALADOS & ALADOS-ARBOLEDAS, 1999; ALADOS-ARBOLEDAS et al., 2000), a PAR pode ser medida por espectro-radiômetro e estimando a PAR pela integração da irradiância espectral na faixa de 0,400 a 0,700 $\mu\text{m}$  ou por meio de sensores quânticos (como o LI 190 SA da LI-COR) instalados a rastreadores solares (como os piranômetros da Eppley PSP e da Kipp and Zonen).

ROSS & SULEV (2000) apontam para o fato da não padronização da faixa PAR ser uma das principais fontes de erro nas medições desta componente da radiação solar global quando aplicado o método indireto, além do que o limite médio de sensibilidade de dois piranômetros amplamente empregados (Eppley PSP e Kipp and Zonen CM6, respectivamente de 0,285 a 2,8  $\mu\text{m}$  e 0,3 a 2,5  $\mu\text{m}$ ) também pode afetar seriamente os resultados. Então, percebe-se que o procedimento indireto nem sempre permite que se tenham exatamente os limites de comprimento de onda na faixa de 0,400 a 0,700  $\mu\text{m}$ , sendo menos preciso que medidas diretas.

Diversos fatores têm sido limitantes no monitoramento da PAR no Brasil. A indisponibilidade de detectores solares nos laboratórios de pesquisa é um dos fatores, uma vez que estes equipamentos ainda são importados e a custos elevados.

Além disso, FRISINA (2000) cita a necessidade de refinada manutenção dos instrumentos, onde se deve considerar a necessidade de freqüentes recalibrações e a qualidade dos sensores disponíveis, que dificultam ainda mais o estabelecimento de bancos de dados da radiação fotossinteticamente ativa, pois a maioria dos detectores da PAR utilizados no país é de natureza quântica, sendo estes sensores sujeitos à degradação, quando expostos constantemente à radiação solar, o que acaba inviabilizando sua utilização por períodos mais longos de tempo.

## 2.4 CARACTERÍSTICAS ESPECTRAIS E FATORES DE CONVERSÃO DA PAR

A radiação fotossinteticamente ativa (PAR) é considerada ou definida, em termos gerais, como a faixa espectral visível da radiação solar. No entanto, a questão da definição da PAR envolve diversos aspectos.

Segundo ALADOS & ALADOS-ARBOLEDAS (1999), a PAR é o termo geral de radiação e pode ser expresso tanto em termos de energia como de densidade de fluxo de fótons fotossintéticos. Em termos de energia, a PAR pode ser expressa como irradiação, ou seja, como densidade de fluxo da energia radiante fotossinteticamente ativa recebida em uma determinada superfície. Dependendo da partição adotada, as unidades são dadas por  $W/m^2$  para valores instantâneos e em  $MJ/m^2$  para valores diários. Em termos de unidades de fluxo de fótons, os valores da PAR são expressas em  $E/m^2$  para valores diários e  $\mu E/m^2$  para valores horários.

Para representação de unidade fotobiológica, a densidade de fluxo do fóton fotossintético é dada como  $\mu E/m^2s$ , quanta/mol ou ainda como  $\mu mol/m^2s$ , sendo estes baseados na faixa de  $0,4 \mu m$  a  $0,7 \mu m$  incidente por unidade de tempo em uma unidade de superfície (ALADOS-ARBOLEDAS et al, 2000).

McCREE (1972) obteve a razão do fluxo de fótons fotossintéticos pelo fluxo de energia PAR para dias de céu nublados em torno de  $4,24 \mu E/J$  e para dias de céu limpo em torno de  $4,57 \mu E/J$ , sugerindo este como fator de conversão de  $\mu E/J$  para  $W/m^2$ , ressaltando que os mesmos variam em torno de  $0,1 \mu E/J$  para mais ou para menos.

Já BAKER & FOUIN (1987) apresentaram em seus estudos valores de aproximadamente  $4,38 \mu E/J$  para a conversão de  $\mu E/J$  para  $W/m^2$ , não levando em consideração o tipo de cobertura do céu.

HOWELL & MEEK (1983) sugeriram que as irradiâncias de ondas curtas, PAR e medições de fluxo de fótons devem ser feitas simultaneamente, evitando as diferenças entre as componentes, obtendo através deste estudo o valor de  $4,7\mu E/J$  para conversão.

Já o manual da LI-COR (1991) recomenda que o fator de conversão de  $\mu\text{E}/\text{J}$  para  $\text{W}/\text{m}^2$  seja  $4,6 \mu\text{E}/\text{J}$ , que é aproximadamente 8% para mais ou para menos do valor determinado por McCREE (1972).

## 2.5 ESTIMATIVA DA PAR

Vários trabalhos estão disponíveis na literatura, onde a PAR foi estimada através de parâmetros da irradiação solar que são medidos com rotina em algumas estações meteorológicas. Esses autores apontam para a necessidade de uma calibração local da relação entre a PAR e a radiação de ondas curtas local, devido às diferenças climáticas locais.

Uma das maneiras usadas para estimar a PAR é através do cálculo do fluxo de densidade de fótons relativa, ou seja, da razão PAR/global proposta inicialmente por McCREE (1972).

Um dos primeiros pesquisadores a estimar a PAR foi MOON (1940), que apresentou a PAR como 44% da radiação solar incidente dentro da faixa espectral de  $0,400 \mu\text{m}$  a  $0,700 \mu\text{m}$ .

YOCUM et al.(1964) registraram que a faixa espectral de 400 a 700nm era 47% da resposta de um piranômetro Eppley, medindo a radiação solar global.

SZEICZ (1966) e (1974) registrou na Inglaterra para dia claro e seco, a proporção da PAR pela radiação global em 50% no verão e 46% no inverno, mostrando que pode ser uma boa aproximação da PAR sendo considerada metade da radiação solar global.

BRITTON & DODD (1976) realizaram nos Estados Unidos, um estudo do percentual PAR/global durante 14 meses. Obtiveram um valor médio de 48% durante o verão e de 46% nos meses de inverno.

STANHILL & FUCHS (1977) consideraram a PAR como fração constante da radiação global, independente das condições atmosféricas (considerando-se elevação solar superior a  $10^\circ$ ). Os dados são provenientes de Israel e Estados Unidos e apresentaram um valor quase constante, de 49%, sendo

de 47% no verão e 49% nas demais estações do ano, diferença não considerada significativa.

HOWELL & MEEK (1983), nos Estados Unidos, estudaram os percentuais da PAR em relação à global, em duas Estações Climáticas, não encontrando tendência de variação mensal ou sazonal, registrando valores médios anuais de 44,5% no verão e 43,6% no inverno. Os dados, segundo eles, também não mostraram efeitos da quantidade de radiação solar e comprimento do dia nos percentuais PAR/global.

MEEK et al. (1984), nos Estados Unidos, propuseram a utilização de uma relação simples entre a PAR e a radiação global. Os autores estimaram a PAR em 45% da global e mostraram que esta pode facilmente ser estimada com erro de 10% ou menos a partir de medidas da radiação global.

KARALIS (1989) utilizou dados da PAR medidos entre 1962 e 1978 em Atenas (Grécia) por meio da utilização de um piranômetro equipado com filtros para a faixa espectral entre 0,400 e 0,695  $\mu\text{m}$ . Os resultados mostraram uma variação anual simples da componente direta da PAR com mais altos valores no período de abril a setembro e mais baixos no inverno. O autor encontrou para a razão entre a PAR direta e a radiação direta total o percentual médio de 40%, variando de 34% a 42%. A componente direta da PAR reduzida à horizontal como fração da irradiação global variou de 32% a 85% com média anual igual a 45%.

GRANT et al. (1996) propuseram equações não lineares com base física que podem ser aplicadas diretamente para a irradiância difusa. Outros aspectos discutidos pelos autores no trabalho referem-se à transmitância e espalhamento da PAR pela atmosfera, sendo diferente da radiação total de ondas curtas e a distribuição da PAR dentro de coberturas vegetais.

No Brasil, vários trabalhos têm sido desenvolvidos no sentido de caracterizar a PAR em diversas regiões.

ASSIS & MENDEZ (1989) apresentaram, no Rio Grande do Sul, uma relação entre os fluxos de radiação fotossinteticamente ativa (em  $\text{E}/\text{m}^2$ ) e de radiação global (em  $\text{MJ}/\text{m}^2$ ), onde a PAR pode ser estimada em 2,23 vezes a

radiação global com erro relativo médio da estimativa dentro da faixa de erro de medida dos dois parâmetros. Nesse trabalho, a razão da PAR em relação ao espectro solar total foi de 47%.

TEIXEIRA et al. (1997) avaliaram a PAR acima e abaixo da folhagem da cultura de videira e obtiveram variação de 0,44 a 0,87 da razão entre a PAR abaixo e acima da folhagem para uma variação de 0,15 à 1,34 de índice de área foliar.

TEIXEIRA et al. (1998) encontraram em Petrolina (PE) o percentual de 45% para a razão da PAR pela total de ondas curtas no período de junho a julho de 1994.

SOUZA (1999) em Pombal-PB, utilizou os índices de claridade e brilho da atmosfera, calculados com dados de irradiâncias solar global, direta e difusa para fazer estimativas da PAR, usando dois modelos propostos por Alados et al. (1996).

### 2.5.1 Estimativa da PAR em Função do Tipo de Cobertura do Céu

O conhecimento sobre o tipo de cobertura do céu durante a análise de dados é muito importante para a avaliação e estimativa da irradiância solar, principalmente no que diz respeito à PAR.

McCREE (1966) encontrou nos Estados Unidos, um valor médio da razão entre a PAR e a radiação solar global de 48%, variando de 47% a 69% em função das condições do céu.

BLACKBURN & PROCTOR (1983) propuseram, no Canadá, uma equação de estimativa da PAR em função da irradiação solar global através de regressão linear simples. Os dados foram obtidos em 186 dias, considerando-se dias de céu claro, parcialmente nublado e nublado, no verão e inverno. Os resultados mostraram uma forte correlação entre as irradiações, sendo a PAR, em média, 47% da irradiação solar global (para uma base diária de dados). Esse percentual variou de 45% a 58%, dependendo da quantidade de nuvens, sendo o valor mínimo para condições de céu claro e o máximo para céu nublado.



TING & GIACOMELLI (1987) mostraram a possibilidade de estimar a PAR utilizando dados disponíveis da radiação solar total e forneceram equações empíricas horárias e diárias para estimar a PAR direta e difusa, baseadas em valores da radiação total. Além disso, apresentaram uma correlação entre a componente difusa da PAR e o coeficiente de transmissão atmosférica, dado pela razão entre a componente global e a radiação no topo da atmosfera, a fim de investigar o efeito combinado da atmosfera e absorção por nuvens.

ASSUNÇÃO (1995) verificou para região de Piracicaba, SP, que, num dia nublado, o total de radiação solar incidente na superfície é relativamente menor, porém mais rico em PAR, em função da absorção da fração de Infravermelho pelas águas das nuvens. Já para um dia praticamente sem nuvens, a fração da PAR variou continuamente; logo, a fração de Infravermelho também variou. A fração da PAR foi menor ao redor do meio-dia, quando o efeito atmosférico foi menor, e foi maior nas horas próximas ao nascer e pôr-do-sol.

PAPAIOANNOU et al. (1996) trabalharam com medidas horárias da PAR, na Grécia, para avaliar a variabilidade temporal da PAR e sua dependência a condições do tempo e poluição atmosférica. Segundo os autores, a razão PAR/global variou de 41,9% (durante o inverno) para 44,6% (no verão), com média anual de 43,6%. Os percentuais aumentaram de 42,8% para 44,4% com as condições do céu variando de aberto para nublado. Paralelamente, os autores apresentam regressões lineares ajustadas entre as radiações global e PAR. Os resultados mostraram que ambas as radiações são altamente correlacionadas e pode-se estimar a PAR através de relações analíticas simples mensais ou sazonais.

ALADOS & ALADOS-ARBOLEDAS (1999) descreveram variações das razões das componentes direta e difusa da PAR em relação à radiação solar em diferentes condições do céu, representadas pelas taxas adimensionais da radiação solar (claridade do céu e brilho da luz do céu), ângulo solar zenital e temperatura do ponto de orvalho. O trabalho mostrou uma dependência das componentes difusa e direta da PAR às condições atmosféricas. Segundo os autores, a variabilidade destas componentes em relação à radiação total de ondas

curtas não pode ser explicada por um único parâmetro. A razão da componente direta pela direta total apresentou dependência principalmente pelo parâmetro de claridade do céu. Por outro lado, a mesma razão para a componente difusa depende acentuadamente dos índices de claridade do céu e brilho da luz do céu. O índice claridade do céu é dependente da quantidade de aerossol e nuvens e o brilho da luz do céu, da carga de aerossol e espessura das nuvens. Isto indica a influência de ambos, nuvens e aerossóis, na distribuição espectral da radiação solar na superfície. A influência do ângulo zenital solar e temperatura do ponto de orvalho (medida de conteúdo de água precipitável) é de ordem secundária.

GONZÁLEZ & CALBÓ (2002) verificaram no modelo obtido para estimar a radiação PAR, usando dados da radiação solar global para a cidade de Girona (Espanha), que a variável tipo de cobertura, parcialmente nublado e nublado, aumenta a fração da irradiação PAR na irradiação global e melhoram a avaliação da PAR, quando comparada com o uso de um único valor constante de proporção.

Os tipos de cobertura do céu (nublado, parcialmente nublado e limpo) foram determinados por vários pesquisadores de diferentes formas. RICIÉRI (1998) determinou uma metodologia para a obtenção do tipo de cobertura do céu em função do índice de claridade ( $k_t$ ), para a cidade de Botucatu/SP e Cascavel/PR, por meio de comparação gráfica das irradiações global, direta e difusa na incidência horizontal. Observou que, no intervalo de  $0 < k_t < 0,3$ , as irradiações global e difusa são praticamente iguais e a irradiação direta próximo de zero, classificando o céu nessas condições como nublado. Para  $0,3 \leq k_t \leq 0,65$ , as radiações difusa e direta mantêm-se próximas, denominando-se céu parcialmente nublado. Para  $k_t > 0,65$ , a irradiação direta se aproxima da global, enquanto a difusa tende ao mínimo, nessas condições, denomina-se céu limpo.

## 2.6 A PAR E O SISTEMA VEGETATIVO

A produtividade biológica de uma vegetação é determinada por sua habilidade em capturar e transformar a radiação solar, constituindo um espectro de interação com a radiação incidente. Neste comprimento de onda, a forma de absorção das *clorofilas* e *carotenóides* presentes nos *cloroplastos* é a mesma, somente alterando a intensidade e velocidade de reação (RAVEN et al. 1999).

Mas, segundo MOTA (1985), existe uma grande variação de rendimento fotossintético, dependendo não só das características óticas das folhas (refletância, transmitância), como fatores agronômicos (condições de cultura, idade, arquitetura foliar, geometria foliar) e de condições do meio ambiente (temperatura, umidade, vento).

Vários pesquisadores estudaram a eficiência da PAR pelas plantas. HALL & RAO (1978) citam que somente uma pequena porcentagem do total de energia luminosa recebida é convertida em energia química, que é armazenada como produto fotossintético e novo material vegetal.

Gaastra (1962) citado por MOTA (1985) comparou em um ensaio com beterraba açucareira a variação estacional de produção de matéria seca em função do potencial fotossintético, verificando que a eficiência de conversão de energia ocorreu no meio da estação, quando a planta estava crescendo ativamente, chegando a uma conversão de 6,1% para a luz visível e 2,5% para o total incidente.

WHATLEY & WHATLEY (1980) citam, que para uma pastagem bem cuidada a conversão da radiação fotossintética chega apenas a 2% da incidente, devido ao alto índice de albedo (radiação refletida) e de conversão em energia térmica e para a cana-de-açúcar a conversão pode apresentar um índice de 7%.

Nos Estados Unidos, HIPPS et al. (1983) estudaram a relação entre a PAR interceptada por diversas variedades de trigo de inverno e o índice de área foliar. Segundo os autores, o percentual de PAR interceptada por uma cultura vegetal é função do índice de área foliar e da cobertura de nuvens quando os valores do índice de área foliar são baixos. Para altos valores de índice de área

foliar, o percentual de PAR interceptada é independente das condições do céu e da qualidade da PAR incidente.

FRANÇA et al. (1999) monitoraram e utilizaram dados da PAR com o objetivo de ajustar, para o milho, um modelo de crescimento, representado pelo acúmulo da matéria seca em função da radiação fotossinteticamente ativa e da temperatura do ar.

SCHOFFEL & VOLPE (2001) estudaram a conversão da PAR interceptada e a produção de fitomassa por três cultivares de soja ('IAC20', 'IAC 8-2' e 'Dourados') plantadas no período de setembro a dezembro de 1998 e verificaram que houve um aumento de fitomassa de forma linear com o acúmulo de radiação interceptada, mostrando que o padrão de resposta depende da cultivar e da época de cultivo sendo os maiores valores obtidos no período de 23/10 a 19/11.

Em sistema de cultivo protegido, SENTELHAS et al. (1997) avaliaram, nos meses de novembro e dezembro de 1996, o efeito de diferentes tipos de cobertura em mini-estufas na atenuação da radiação solar e da luminosidade. De acordo com os autores, a atenuação da radiação solar, através dos processos de reflexão e absorção, quer seja no seu espectro total como na fração PAR e no próprio saldo de radiação, é dependente do tipo de material. O polietileno de baixa densidade provocou atenuação da radiação solar global, de 20,3%, a PAR, de 13,3% e o saldo de radiação, de 22,6%.

No mesmo ano, PEZZOPANE et al. (1997) determinaram, no período de setembro a dezembro, atenuação média da radiação solar global de 42% e de 45% da PAR, em tela com especificação comercial de 50%. Já VOLTOLINI et al. (1997) avaliaram a transmissividade da radiação fotossinteticamente ativa em telas de polipropileno (sombrites comerciais). Os autores observaram diferentes resultados para dias de céu aberto e nublado: o sombreamento proporcionado pelas telas de 30, 50 e 70% foi de 35,2; 54,1 e 77,0% em dias de céu limpo e de 39,7; 63,2 e 81,4% em dias nublados.

RADIN et al. (2003) estudaram a cultura do tomateiro em diferentes ambientes e concluíram que para um mesmo valor da PAR interceptada, se

obtem maior eficiência de uso da radiação pelo tomateiro, quando cultivado em estufa sendo essa maior no período verão-outono, em que houve maior disponibilidade de PAR incidente e conseqüentemente maior transmissividade interna na estufa.

ATROCH et al. (2001) estudaram e avaliaram o efeito de três condições de sombreamento, caracterizado pela redução de 0%, 30% e 50% da radiação solar incidente, no crescimento, teor de clorofila, distribuição de biomassa e característica anatômicas das plantas jovens e concluíram que o tratamento de 30% de sombreamento se mostrou mais eficiente, pois apresentou um alto teor de transmissividade externa/interna da PAR, maior dispersão interna e absorção e transformação da irradiância em energia química fotossintetizante pelas planta.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 LOCALIZAÇÃO DO EXPERIMENTO

O experimento foi conduzido na estação meteorológica experimental no Campus da UNIOESTE, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, instalada no município de Santa Helena/PR, com latitude de 24°51'S, longitude de 54°19'W-GR e altitude de 258 m.

#### 3.2 INSTRUMENTOS DE MEDIDAS

As medidas de radiação solar global foram obtidas por um piranômetro da Kipp & Zonen, modelo CM3, apresentado na Figura 1, com constante de calibração igual a  $18,99 \mu\text{V}/\text{Wm}^2$ , posicionado em um plano horizontal. Os dados da radiação solar global fotossinteticamente ativa (PAR) foram coletadas por um piranômetro com sensor quântico da marca LI-COR.



**Figura 1** Piranômetro Kipp & Zonen - modelo CM3.

#### 3.3 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Na aquisição de dados, utilizou-se um DATALOGGER da CAMPBELL SCIENTIFIC - INC modelo CR10X, indicado na Figura 2, operando na frequência de 1 Hz, captando as leituras a cada segundo e armazenando médias de 5 minutos.



**Figura 2** Datalogger da CAMPBELL SCIENTIFIC - INC modelo CR10X, com micrologger.

### 3.4 PARTIÇÃO DA BASE DE DADOS

Na busca de possíveis erros na coleta, armazenamento ou na transferência dos dados, os valores de densidade de fluxo de todas as componentes foram individualmente verificados. Os valores negativos e zeros absolutos foram excluídos.

Da série de dados, compreendida entre 01/08/03 a 30/04/05, foram separados para a geração dos modelos as medidas equivalentes ao período de 23/09/03 a 22/09/04 e o restante para a validação.

Os dados utilizados para a geração dos modelos foram separados em partições mensal, sazonal e anual e também considerando o tipo de cobertura (céu limpo, céu parcialmente nublado e céu nublado) da seguinte forma:

- a) Partição anual - separaram-se os dados do período de 23 de setembro de 2003 a 22 de setembro de 2004, totalizando 366 dias;
- b) Partição sazonal – separaram-se os dados do dia 23 de setembro a 20 de dezembro para equinócio de primavera; 21 de dezembro a 20 de março para solstício de verão; 21 de março a 21 de junho para equinócio de outono e 22 de junho a 22 de setembro para solstício de inverno;
- c) Partição mensal: separaram-se os dados do dia 1º ao último dia de cada mês, totalizando uma série de 12 meses de setembro de 2003 a agosto de 2004. Como não foi possível coletar os dados nos meses de maio, junho e julho de 2004, separou-se antes da modelagem, aleatoriamente, 10 dias de cada um dos referidos meses do ano de 2004 para validação do modelo;
- d) Tipo de cobertura do céu: separaram-se os dados do período de 23/09/03 a 22/09/04 utilizando-se a metodologia determinada por RICIERY (1998), do tipo de cobertura do céu em função do índice de claridade ( $k_t$ ). Considerou-se que no intervalo de  $0 < k_t < 0,3$  como nublado, para  $0,3 \leq k_t \leq 0,65$  como céu parcialmente nublado e para  $k_t > 0,65$  como céu limpo, onde  $k_t$  é calculado pela razão entre a irradiação solar global ( $R_{glo}$ ) e a irradiação no topo da atmosfera ( $R_o$ ).

Para a validação do modelo, foram respeitadas as mesmas datas referentes à partição mensal, sazonal e anual assim como a mesma separação para o tipo de cobertura do céu, utilizando os dados da irradiação PAR global coletada no período de 01/08/03 a 22/09/03, de 23/09/04 a 30/04/05, além dos 10 dias dos meses de maio, junho e julho de 2004, separados aleatoriamente.



### 3.5 PROCESSAMENTO DOS DADOS

Os sinais gerados pelos instrumentos foram introduzidos na forma de colunas de dados no programa ORIGIN<sup>®</sup> 6.0. Este programa, ao receber os fatores de calibração de cada instrumento, gera colunas de sinais em unidade de potência ( $W/m^2$ ), e permite fornecer as curvas de irradiâncias, que constituem a partição instantânea, como ilustrado na Figura 3.

Os valores das irradiações foram obtidos através da integração dos valores média de 5 minutos da irradiância global ( $I_{glo}$ ) e PAR ( $I_{PAR}$ ), ou seja, o programa integra as áreas abaixo das curvas de irradiâncias e fornece os valores diários das irradiações  $R_{glo}$  e  $R_{PAR}$ , em  $MJ/m^2$ .

Integração diária da irradiância  $Y$  é definida em 1:

$$R_Y = \int_{t_1}^{t_2} I_Y dt \quad (1)$$

Em termos gerais, as irradiações de ondas curtas estão representadas por  $R_Y$ , no intervalo de 1 dia e  $Y$  representa cada componente da irradiação solar.

**Figura 3** Densidade de fluxo da irradiância global ( $I_{glo}$ ) e PAR global ( $I_{PAR}$ ) ilustrando a partição instantânea para o dia 12/01/2004.

### 3.6 Equações utilizadas para estimar a radiação no topo da atmosfera ( $R_o$ )

Elaborou-se um programa computacional em BASIC para os cálculos da declinação Solar ( $\delta$ ), ângulo horário ( $W_s$ ), fator de correção da excentricidade da órbita terrestre ( $E_o$ ), radiação no topo da atmosfera ( $R_o$ ) e cálculo do índice de claridade ( $k_t$ ). As equações estão representadas de 2 a 7 e são citadas por IQBAL (1983). Os resultados gerados pelo programa são inseridos em planilhas do programa “Software Microcal Origin”, juntamente com os dados experimentais referentes aos respectivos dias.

A irradiação solar incidente em uma superfície horizontal no topo da atmosfera em MJ/m<sup>2</sup> é definida em 2:

$$R_o = \frac{24}{\pi} 1367 E_o \left( \frac{\pi}{180} W_s \sin \Phi \sin \delta + \cos \Phi \cos \delta \sin W_s \right) \quad (2)$$

sendo:

$W_s$  : ângulo solar em graus, obtido pela equação 3:

(3)

$\delta$  : a declinação solar em graus calculado pela equação 4:

$$\delta = 23,45 \operatorname{sen} \left[ \frac{360}{365} (284 + DJ) \right] \quad (4)$$

onde:  $DJ$  : Dia Juliano;

$\Phi$  : latitude local em graus;

$E_o$ : fator de correção da excentricidade da órbita terrestre, dado pela fórmula 5:

$$E_o = 1,000110 + 0,034221 \cos \Gamma + 0,00128 \sin \Gamma + 0,000719 \cos 2\Gamma + 0,000077 \sin 2\Gamma \quad (5)$$

Sendo  $\Gamma$  definida pela equação 6:

|

(6)

### 3.6.1 Índice de Claridade

O índice de claridade é calculado pela razão entre a radiação solar global ( $R_{glo}$ ) e a radiação no topo da atmosfera ( $R_o$ ), dado pela equação 7:

$$K_t = \frac{R_{glo}}{R_o} \quad (7)$$

## 3.7 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS MODELOS

Para a construção dos modelos de estimativa da PAR, por meio dos valores da radiação solar global, foi utilizada a regressão linear simples com equação da forma 8:

$$y = \alpha x + \beta \quad (8)$$

A escolha da equação deve levar em consideração que o coeficiente linear ( $\beta$ ) teoricamente deve tender a zero, pois, uma vez que em condições de ausência de irradiação global, a irradiação fotossinteticamente ativa também é nula. Portanto, a equação deverá ser da forma da equação 9:

$$R_{PAR} = \alpha * R_{glo} \quad (9)$$

sendo:

$R_{PAR}$  : irradiação solar PAR incidente;

$R_{glo}$  : irradiação solar global incidente na superfície;

$\alpha$  : Coeficiente angular.

Existem diversas formas para forçar a reta a passar por zero (Snedecor & Cochran, 1967 citados por HOWELL et al., 1983). Um primeiro método consiste em se utilizar como coeficiente angular a razão calculada através dos valores acumulados entre a PAR e a global, chamado de percentual da somatória, dada por 10:

$$\Delta (s) = \frac{\sum_{i=1}^n R_{PAR}}{\sum_{i=1}^n R_{glo}} \quad (10)$$

O segundo método consiste em se obter um valor médio das razões individuais entre a PAR e a global, chamado de média dos percentuais individuais dada por 11:



Em ambos os métodos, a variância dos resíduos não é constante. Um terceiro método é construir um modelo de regressão linear simples e realizar a análise de variância, a fim de comprovar estatisticamente se os dados apresentam variações discrepantes e teste de hipótese sobre a nulidade do parâmetro ( $\beta$ ). Assim, excluimos o valor do coeficiente linear da regressão ( $\beta$ ), caso este não seja significativo ao nível de  $\alpha\%$  de significância, conhecido como teste t-Student.

O quarto método de modelagem é ajustar a reta, forçando sua passagem pela origem, conhecida por regressão pela origem.

Neste estudo, foram avaliados todos os métodos e comparados seus coeficientes entre si, sendo considerado o coeficiente angular ( $\alpha$ ) da equação obtida após o teste t-Student, quando o coeficiente linear foi não significativo. Caso contrário, determinou-se a reta passar por zero.

### 3.8 ÍNDICES ESTATÍSTICOS EMPREGADOS

Para a validação do modelo, foram utilizados o coeficiente de correlação ( $R$ ), valores estimados ( $R_{PAR_{est}}$ ) e reais ( $R_{PAR_{med}}$ ) da irradiação PAR, erros médios diários  $|\Delta|(\%)$  e desvio padrão residual ( $St$ ).

O coeficiente de determinação é uma medida descritiva da qualidade do ajustamento obtido e baseia-se em um índice estatístico ( $R^2$ ), que indica a proporção da variação de  $Y$  que é “explicada” pela regressão. A regressão será tanto mais útil, quanto mais próximo de um estiver o valor de  $R^2$  (HOFFMANN & VIEIRA, 1998).

A expressão  $R^2$  é definida pela equação 12:



|

(12)

sendo:

SQR : Soma do quadrado da regressão;

SQT : Soma do quadrado total, dado pela soma do quadrado da regressão e do quadrado residual.

É aconselhável, por diversos autores, não utilizar o  $R^2$  para modelos que passam pela origem (ZAR, 1996). Uma das razões é a soma dos resíduos não resultar em zero e, em alguns casos particulares, a soma dos quadrados desses resíduos superar a soma de quadrados do total corrigido, proporcionando  $R^2$  negativos.

Portanto, neste trabalho, será usado apenas o coeficiente de correlação  $R$ , dado pela raiz quadrada do  $R^2$ , e será usado para justificar a correlação entre a PAR medida e estimada.

Os valores médios da irradiação PAR global medida ( $R_{PARmed}$ ) e estimada ( $R_{PARest}$ ), determinada pela média dos valores mensais, sazonais e anuais, são comparados entre si para ressaltar diferenças significativas e valores discrepantes gerados pelos modelos determinados.

O valor dos erros médios diários,  $|\Delta|(\%)$  é uma medida de avaliação da diferença residual gerada na comparação individual entre os valores medidos e estimados. Quando o valor gera percentuais negativos temos uma subestimação do modelo para a irradiação PAR a partir da global, caso contrário, se o valor gera percentuais positivos temos uma superestimação do modelo. Esse índice é expresso pela equação 13:

$$\Delta (\%) = 100 * ((R_{PARmed} - R_{PARest}) / R_{PARmed}) \quad (13)$$

sendo:

$R_{PARmed}$ : Irradiação fotossinteticamente ativa – PAR – medida;

$R_{PARest}$ : Irradiação fotossinteticamente ativa – PAR - estimada.

Para a geração dos gráficos de desvio será utilizado os valores de  $\Delta(\%)$  e para o cálculo das médias dos erros será utilizado o módulo dos erros médios diários, isto é,  $|\Delta \ %|$ .

Outro valor estatístico empregado na avaliação dos modelos foi o desvio padrão residual ( $St$ ), dado pela raiz quadrada do erro quadrático médio e é representado pela expressão 14:

$$St = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (R_{PARmed} - R_{PARest})^2}{n} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

Esse é freqüentemente usado na avaliação de modelos em ciências físicas, como meteorologia e oceanografia (Atwater and Ball, 1978, citados por WILLMOTT, 1976), sendo facilmente interpretado, desde que se tenha o cuidado de utilizar as mesmas dimensões para os valores estimados e medidos.

Segundo WILLMOTT (1976), somente o uso do coeficiente de correlação ( $R$ ) ou do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), conjuntamente com os testes sobre sua significância estatística, são inadequados na validação de modelos. Se por um lado os índices  $R$  e  $R^2$  descrevem bem consistentes acréscimos e decréscimos proporcionais sobre as respectivas médias de duas variáveis, por outro lado eles não fazem distinção entre o tipo e magnitude de possíveis covariâncias.

Segundo STONE (1993), as desvantagens do desvio padrão residual ( $St$ ) são que alguns erros de grande proporção na soma podem causar acréscimos significativos nos valores de ( $St$ ), além do que ele não diferencia superestimativa de subestimativa, o que é corrigido pela análise do valor de  $\Delta(\%)$ . Em geral, quanto menores os valores obtidos para o ( $St$ ), melhor a performance dos modelos.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 COMPORTAMENTO DA RADIAÇÃO SOLAR NA REGIÃO DE SANTA HELENA

#### 4.1.1 Irradiações Diárias

A Figura 4 mostra o comportamento da irradiação solar no topo da atmosfera ( $R_o$ ), da irradiação solar global ( $R_{glo}$ ) e da irradiação solar PAR ( $R_{PAR}$ ), a partir do valor diário para o período de 23 de setembro de 2003 a 22 de setembro de 2004 na região de Santa Helena. Verifica-se que as componentes possuem um comportamento similar para ambas as curvas, com variações dos níveis de irradiação solar em função da declinação solar, que varia de  $23,45^\circ$  a  $-23,45^\circ$ , sendo os maiores valores no período de primavera e verão e os menores no de outono e inverno.

O grande número de valores próximo de zero indica dias de alta nebulosidade, onde na classificação através do índice de claridade se enquadram na faixa  $k_t < 0,65$ . A irradiação solar no topo da atmosfera apresentou como limite mínimo  $20,95 \text{ MJ/m}^2$ , no dia 22 de junho e máximo de  $38,14 \text{ MJ/m}^2$ , no dia 21 de dezembro, com média de  $37,39 \text{ MJ/m}^2$ .

Para irradiação solar global, temos o mínimo de  $0,36 \text{ MJ/m}^2$ , no dia 26 de junho de 2004 e máximo de  $31,50 \text{ MJ/m}^2$ , no dia 17 de dezembro de 2003, com média de  $18,15 \text{ MJ/m}^2$ . A irradiação solar PAR apresentou um mínimo de  $0,15 \text{ MJ/m}^2$ , no dia 26 de junho de 2004 e máximo de  $12,08 \text{ MJ/m}^2$ , no dia 14 de novembro de 2003, com média de  $6,58 \text{ MJ/m}^2$ .

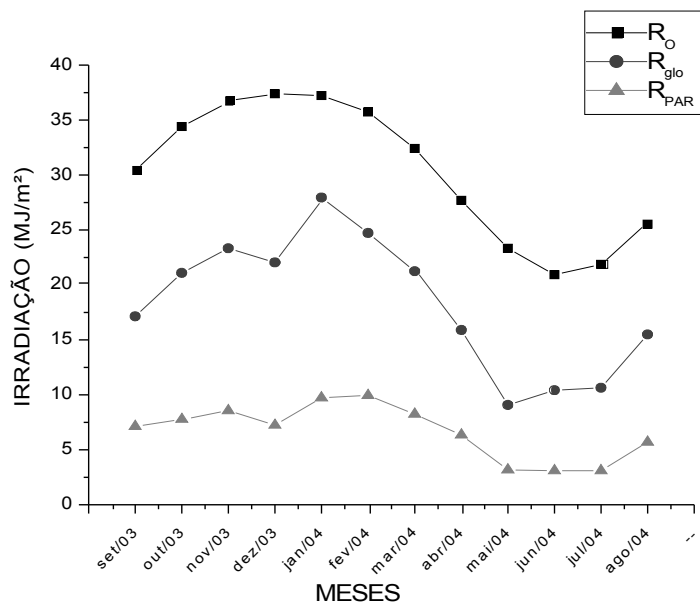
A média de irradiação solar global incidente na superfície local, no período analisado, corresponde a 59,9% da incidente no topo da atmosfera e para a irradiação PAR 21,73%, sendo condizentes com os valores encontrados por STIGTER & MUSABILHA (1982) para a razão entre a global e PAR.

**Figura 4** Médias diárias de irradiação solar no topo da atmosfera, global e PAR para o período de 23/09/2003 a 31/12/2003 (1 a 100) e de 01/01/2004 a 22/09/2004 (101 a 366).

#### 4.1.2 Irradiações Médias Mensais

Os valores médios mensais diários para as componentes  $R_O$ ,  $R_{glo}$  e  $R_{PAR}$  no tempo em meses estão ilustrados na Figura 5. O valor energético das componentes vai aumentando proporcionalmente à medida que nos aproximamos do verão, e diminuindo à medida que nos aproximamos do inverno, com o observado na radiação diária.

Não houve semelhança dos valores máximos e mínimos obtidos em meses específicos com os valores máximos e mínimos das irradiações médias mensais no topo, como no mês de dezembro. Esse fato seria esperado, já que em dezembro deveriam estar contidos os maiores valores, por ser o mês que contém o solstício de verão e junho onde teríamos os menores valores, por ser quando ocorre o solstício de inverno. Tal comportamento ocorre devido à irradiação ter um caminho a percorrer na atmosfera, podendo ser espalhado ou difundido por partículas e gases como os que encontramos em dias de grande nebulosidade.



**Figura 5** Irradiações médias mensais no topo da atmosfera, global e PAR para o período de 23 de setembro de 2003 a 22 de setembro de 2004.

O maior valor médio mensal observado na Figura 5, para a componente  $R_O$ , ocorreu no mês de dezembro de 2003, sendo equivalente a  $37,39 \text{ MJ/m}^2$ , para  $R_{glo}$  no mês de janeiro de 2004, sendo equivalente a  $27,94 \text{ MJ/m}^2$  e para a componente  $R_{PAR}$  no mês de fevereiro de 2004 igual a  $9,95 \text{ MJ/m}^2$ .

Já as componentes  $R_O$  e  $R_{PAR}$  apresentaram os menores valores médios mensais, respectivamente iguais a  $20,93 \text{ MJ/m}^2$  e  $3,09 \text{ MJ/m}^2$  no mês de junho de 2004, enquanto que o menor valor mensal acumulado para  $R_{glo}$  ocorreu no mês de maio sendo igual a  $9,07 \text{ MJ/m}^2$ .

#### 4.1.3 Irradiações Diárias Mensais Acumuladas

Os valores mensais acumulados são um importante parâmetro, que permite estimar a performance de coletores solares, contribuindo com a descrição da variação sazonal da radiação solar (DUFFIE & BECKMAN, 1980).

Avaliando a Figura 6, verifica-se que as componentes  $R_O$ ,  $R_{glo}$  e  $R_{PAR}$ , obtidas com base nas irradiações diárias mensais acumuladas, apresentaram tendências idênticas e proporcionais.

**Figura 6** Irradiações diárias mensais acumuladas no topo da atmosfera, global e PAR para o período de 23 de setembro de 2003 a 22 de setembro de 2004.

As componentes  $R_O$  e  $R_{PAR}$  apresentaram os menores valores médios mensais acumulados, respectivamente iguais a  $585,99 \text{ MJ/m}^2/\text{mês}$  e  $92,78 \text{ MJ/m}^2/\text{mês}$ , no mês de junho de 2004, enquanto que o menor valor mensal acumulado para  $R_{glo}$  ocorreu no mês de maio, sendo igual a  $281,32 \text{ MJ/m}^2/\text{mês}$ , comportamento semelhante ao encontrado para a irradiação média mensal.

Já as componentes  $R_{glo}$  e  $R_{PAR}$  apresentaram seus maiores valores médios mensais acumulados no mês de janeiro de 2004, sendo respectivamente iguais a  $866,22 \text{ MJ/m}^2/\text{mês}$  e  $301,81 \text{ MJ/m}^2/\text{mês}$ , enquanto que o maior valor mensal acumulado para  $R_O$  ocorreu em dezembro de 2004 com  $1122,38 \text{ MJ/m}^2/\text{mês}$ .

#### 4.1.4 Irradiações Horárias Para Solstício de Inverno

A evolução das irradiações  $R_O$ ,  $R_{glo}$  e  $R_{PAR}$  em função da hora local para o solstício de inverno está ilustrada na Figura 7. Nota-se comportamento similar entre as curvas sem oscilações, ou seja, neste dia o céu estava limpo podendo ser classificado através do índice de claridade na faixa  $k_t > 0,65$ .

**Figura 7** Irradiações horárias para o solstício de inverno (21/06/2004), no topo da atmosfera, global e PAR.

Nota-se, portanto, que no dia mais curto do ano (21/06/2004), os primeiros valores medidos da  $R_{glo}$  ocorreram por volta das 7 horas e 15 minutos e os últimos por volta das 17 horas e 50 minutos.

A figura também permite observar que por volta das 12 horas, o valor de  $R_o$  foi próximo de  $3,15 \text{ MJ/m}^2$  e o de  $R_{glo}$  foi próximo de  $2,03 \text{ MJ/m}^2$ , representando cerca de 64,44% da  $R_o$ , ou seja, um montante de  $1,12 \text{ MJ/m}^2$  foi atenuado pela atmosfera.

Para o mesmo horário em questão, dos aproximados  $2,03 \text{ MJ/m}^2$  que incidiram a superfície, cerca de  $0,60 \text{ MJ/m}^2$  representam  $R_{PAR}$  com índice de 29,56% da  $R_{glo}$ .

Esses valores são próximos aos encontrados por GOMES (2002) em Botucatu/SP, que obteve um índice 64,62% para a razão entre a irradiação global e topo e um índice 29,23% para a razão entre a irradiação PAR e global em um dia com mesma característica.

#### 4.1.5 Irradiações Horárias para o Solstício de Verão

Os valores para as irradiações  $R_o$ ,  $R_{glo}$  e  $R_{PAR}$  em função da hora local para o dia mais longo do ano está ilustrada na Figura 8. No dia mais longo do ano (22/12/2003), os primeiros valores medidos da  $R_{glo}$  ocorreram por volta das 5 horas e 40 minutos e os últimos por volta das 19 horas e 05 minutos.

Nota-se comportamento similar entre as curvas, mas com oscilações no decorrer do dia, ou seja, neste dia o céu estava parcialmente nublado, podendo ser classificado através do índice de claridade na faixa  $k_t < 0,65$ .

**Figura 8** Irradiações horárias para o solstício de verão (22/12/2003), no topo da atmosfera, global e PAR.

A Figura 8 mostra que por volta das 12 horas, todas as componentes apresentaram uma ordem de grandeza energética maior que a encontrada no solstício de inverno. Esse comportamento era esperado, já que nesse dia temos a menor distância terra-sol, pois representa o solstício de verão.



O valor obtido para a componente  $R_o$  foi  $5,66 \text{ MJ/m}^2$ , enquanto que  $R_{\text{glo}}$  foi próximo de  $2,52 \text{ MJ/m}^2$ , representando cerca de  $44,52\% R_o$ , indicando que um montante de  $3,14 \text{ MJ/m}^2$  foi atenuado pela atmosfera.

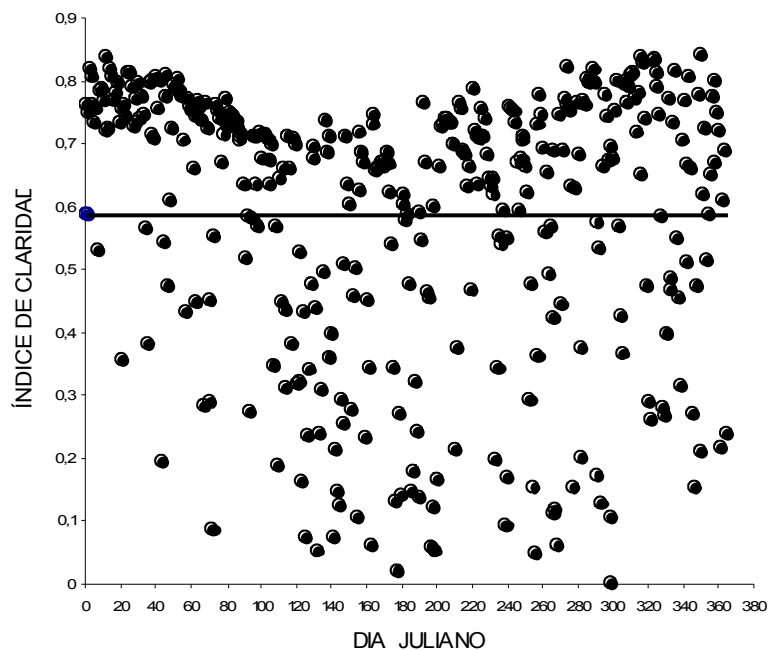
Para o mesmo horário em questão, dos aproximados  $2,52 \text{ MJ/m}^2$  que incidiram a superfície, cerca de  $0,82 \text{ MJ/m}^2$  representam  $R_{\text{PAR}}$  (representando cerca de  $32,54\%$  da  $R_{\text{glo}}$ ).

#### 4.1.6 Índice de Claridade $K_t$

A Figura 9 mostra a variação do índice de claridade ( $k_t$ ) a partir das médias diárias ao longo do período analisado. Houve uma variação de  $0,05$  a  $0,83$  com média de  $0,58$ . Como não foram observados valores de  $k_t$  superiores a  $0,83$ , este constitui o limite máximo de claridade local, indicando que a irradiação solar global local incidente na superfície é inferior a  $83\%$  da incidente no topo da atmosfera.

Comparando os resultados da Figura 9 com os obtidos por RICIÉRI (1998), para a cidade de Botucatu, verifica-se que estão muito próximos. Neste estudo, o autor encontrou o intervalo de  $0 \leq k_t \leq 0,8$ , mostrando que a irradiação solar incidente na superfície local é inferior a  $80\%$  da irradiação incidente no topo da atmosfera.

O intervalo de  $0,65 < k_t \leq 0,83$  é o que apresentou maior densidade de pontos, com  $56,01\%$  dos dias, sendo considerado dia de céu limpo. No intervalo de  $0,3 \leq k_t \leq 0,65$  encontramos  $28,42\%$  dos dias, sendo considerado dia de céu parcialmente nublado e  $0,01 < k_t < 0,3$  com  $15,57\%$  dos dias, considerado dia de céu nublado.



**Figura 9** Médias diárias do índice de claridade ( $k_t$ ) para o período de setembro de 2003 a setembro de 2004.

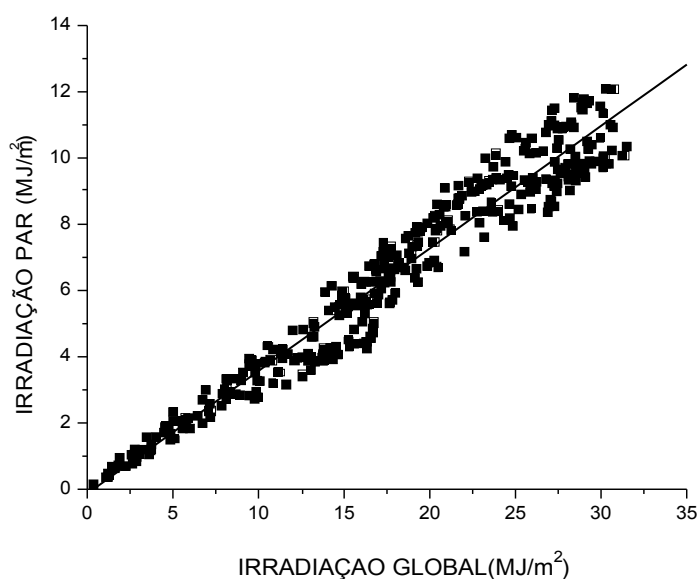
## 4.2 EQUAÇÕES ENCONTRADAS

As equações para as diferentes partições foram encontradas por meio de regressão linear simples, totalizando 37 figuras. Para todas as equações, foi realizada a análise de variância, testes de hipóteses sobre a nulidade do parâmetro ( $\beta$ ), utilizando a distribuição de t-Student ao nível de 5% de significância, razão da somatória e média das razões individuais entre a PAR e a global e regressão com coeficiente linear nulo.

Serão apresentadas as equações em forma de tabela e apenas a primeira figura de cada partição, devido a grande quantidade e por serem similares em termos de distribuição.

### 4.2.1 Modelo Para Partição Anual

A Figura 10 representa a curva de regressão linear simples para estimativa da irradiação PAR em função da irradiação solar global, com partição anual. Observa-se uma boa distribuição dos pontos ao longo da reta, variando no intervalo de  $3,07\text{MJ/m}^2$  a  $31,79\text{MJ/m}^2$  para a global e de  $1,13\text{MJ/m}^2$  a  $11,054\text{MJ/m}^2$  para a PAR.



**Figura 10** Curva de regressão linear simples, com partição anual, para estimativa da irradiação PAR em função da radiação global em  $\text{MJ/m}^2$ .

A reta de regressão, indicada na Figura 10, tem coeficiente angular ( $\alpha$ ) de 0,37 e não passa pela origem, pois o coeficiente linear ( $\beta$ ) é de -0,135, o que leva a uma irradiação PAR negativa quando a irradiação global incidente na superfície é zero. Teoricamente, o coeficiente linear para este tipo de relação deveria ser zero, uma vez que em condições de ausência de irradiação global, a irradiação fotossinteticamente ativa é nula.

Para correção de tal fato, pode-se realizar teste de nulidade para o parâmetro linear usando o teste t-Student, com um nível de 5% de significância. Caso este não seja significativo, pode-se descartá-lo.

Realizando a análise de variância dos dados para a obtenção das estatísticas de avaliação ( $R^2$ , R e teste F de Snedecor) e teste de significância para o parâmetro ( $\beta$ ), verificou-se que o mesmo é não significativo. A nova equação obtida para o modelo I está representada na Tabela 1, onde o coeficiente angular se manteve 0,37, ou seja, a radiação PAR corresponde a 37% do valor da irradiação solar global incidente. Valores próximos foram observados por FRANÇA et.al. (1997), no Rio Grande do Sul, que obtiveram um modelo de regressão linear estimando PAR em 42% da irradiação global e em Botucatu/SP, por FRISINA (2002), que estimou a PAR em 43% da global.

Pode-se observar que a variação entre o coeficiente angular do modelo anual e média anual dos percentuais individuais e percentual da somatória anual, dadas pelas equações 15 e 16





não são constantes, mas apresentam pouca diferença (aproximadamente 5%). A maior discrepância encontrada foi entre o coeficiente angular e a média anual dos percentuais individuais, sendo de 5,12%; já entre o coeficiente angular e o percentual da somatória anual foi de apenas 2,63%.

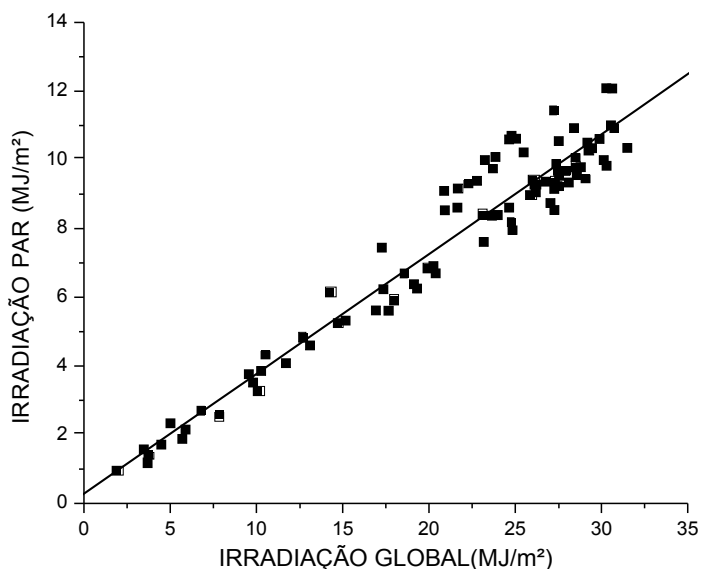
**Tabela 1** Equação após teste de significância, média dos percentuais individuais e percentual da somatória para o modelo I

PARTIÇÃO	EQUAÇÃO	MÉDIA ANUAL DOS PERCENTUAIS INDIVIDUAIS	PERCENTUAL DA SOMATÓRIA ANUAL
Anual	$R_{PAR} = 0,37 * R_{glo}$	0,39	0,38

Fazendo um estudo de limite na equação obtida após o teste de significância, verificou-se que a irradiação PAR tende a zero, quando a irradiação global tende a zero (coeficiente linear nulo) e a máxima de 14,11 MJ/m<sup>2</sup>, quando a irradiação global tende a 100% da radiação máxima atingida no topo da atmosfera.

#### 4.2.2 Modelo Para Partição Sazonal

A Figura 11 representa o modelo de regressão linear simples para estimativa da irradiação PAR em função da irradiação solar global com partição sazonal. Observa-se uma boa distribuição dos pontos ao longo da reta, variando no intervalo de 3,07 MJ/m<sup>2</sup> a 31,79 MJ/m<sup>2</sup> para a global e de 1,13 MJ/m<sup>2</sup> a 11,05MJ/m<sup>2</sup> para a PAR, como encontrado no modelo anual, ou seja, neste período (primavera) foi encontrado as maiores irradiações incidentes.



**Figura 11** Curva de regressão linear simples, para estimativa da irradiação PAR em função da irradiação global em MJ/m<sup>2</sup> para a primavera.

Pode-se observar que a reta de regressão, indicada na Figura 11, não passa pela origem e apresenta um coeficiente linear ( $\beta$ ) de -0,29 e coeficiente angular ( $\alpha$ ) de 0,35 na primavera, o que leva a uma irradiação PAR negativa, quando a irradiação global incidente tende a ser zero. O mesmo fato ocorreu para as estações, outono e inverno com coeficientes linear ( $\beta$ ) = -0,53 e -0,27 e coeficientes angulares ( $\alpha$ ) = 0,40 e 0,37 respectivamente; já no verão o coeficiente linear ( $\beta$ ) foi positivo (0,62) e o angular ( $\alpha$ ) foi de 0,34, o que leva a uma superestimação da irradiação PAR, pois quando a irradiação global tender a zero a PAR tende a 0,62 MJ/m<sup>2</sup>.

Realizando a análise de variância dos dados para a obtenção das estatísticas de avaliação ( $R^2$ , R e teste F de Snedecor) e teste t-Student de significância ao nível de 5% para o coeficiente linear, verifica-se que o mesmo é não significativo para as estações primavera, verão e inverno, podendo ser descartado.

Para a estação outono, o coeficiente linear apresentou valor significativo, ao nível de 5% de significância. Vários pesquisadores sugerem, para esse caso,



forçar o intercepto a zero e propõem diferentes métodos (SNEDECOR & COCHRAN, 1972; HOWELL et.al., 1983).

Neste trabalho, para cada regressão linear onde fisicamente é coerente que a reta de regressão linear passe pela origem, mas que o valor do coeficiente linear foi significativo ao nível de 5% através do teste t (portanto não podendo ser descartado), foi efetuado um novo ajuste, forçando a reta passar pela origem, reduzindo a equação a forma  $R_{PAR} = \alpha * R_{glo}$ . Para a estação outono, o coeficiente angular passou de 0,40 para 0,37, igualando-se ao encontrado na equação de regressão da estação inverno.

Avaliando a Tabela 2, onde são apresentadas as equações para o modelo II, verifica-se que o coeficiente angular variou de 0,34 para o verão a 0,37 para o outono e inverno, ou seja, a irradiação solar fotossinteticamente ativa variou de 34% a 37% da irradiação global incidente na partição sazonal, sendo que para primavera e verão a variação foi muito pequena.

Comparando os valores obtidos para o coeficiente angular do modelo II, indicados na Tabela 2, conclui-se que diferiu em menos de 8% dos valores obtidos através da média sazonal dos percentuais individuais ( $\Delta(i)$ ) e do percentual da somatória sazonal ( $\Delta(s)$ ).

**Tabela 2** Equação após teste de significância, média dos percentuais individuais e percentual da somatória para o modelo II

PARTIÇÃO	EQUAÇÃO	MÉDIA SAZONAL DOS PERCENTUAIS INDIVIDUAIS	PERCENTUAL DA SOMATÓRIA SAZONAL
Primavera	$R_{PAR} = 0,35 * R_{glo}$	0,36	0,36
Verão	$R_{PAR} = 0,34 * R_{glo}$	0,37	0,37
Outono	$R_{PAR} = 0,37 * R_{glo}$	0,37	0,36
Inverno	$R_{PAR} = 0,37 * R_{glo}$	0,35	0,35

Os valores da média sazonal dos percentuais individuais e do percentual da somatória sazonal apresentaram valores iguais no período da primavera, com baixa discrepância em relação ao coeficiente angular ( $\alpha = 0,35$ ), que foi apenas 2,86% menor. No verão, os índices percentuais também foram iguais, mas

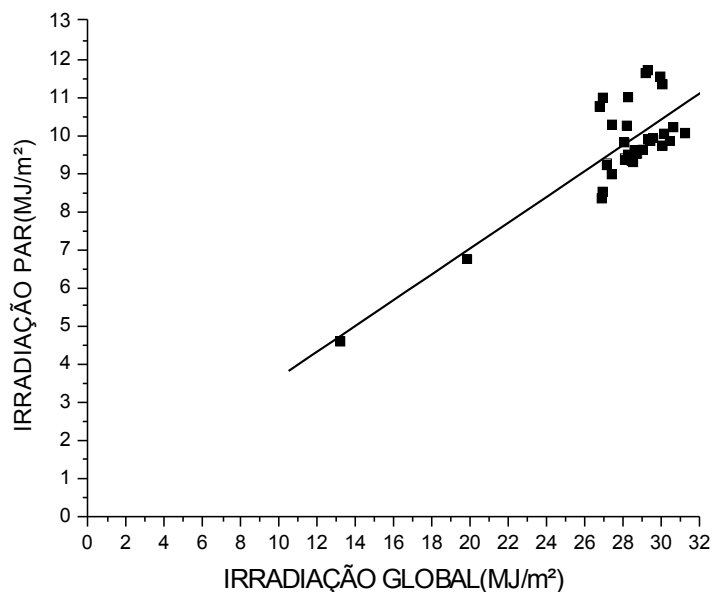
apresentaram a maior discrepância entre todas as partições em relação ao coeficiente linear ( $\alpha = 0,34$ ), que foi 8,82% menor.

Já para o coeficiente angular da equação do outono ( $\alpha = 0,37$ ), a diferença foi nula em relação à média sazonal dos percentuais individuais e de apenas 2,78% em relação ao percentual da somatória sazonal, sendo a menor discrepância encontrada para o modelo II. O coeficiente angular da equação do inverno ( $\alpha = 0,37$ ) foi 5,75% maior que os índices percentuais, que não diferenciaram entre si.

Fazendo um estudo de limite nas equações, verificou-se que a irradiação PAR tende a zero, quando a irradiação global tende a zero (coeficiente linear nulo) em todas as estações e apresenta o limite máximo de irradiação solar PAR, quando a irradiação global tende a 100% da radiação máxima atingida no topo da atmosfera, na primavera de 13,09 MJ/m<sup>2</sup>, no verão de 12,91 MJ/m<sup>2</sup>, no outono de 11,86 MJ/m<sup>2</sup> e 11,06 MJ/m<sup>2</sup> no inverno.

#### 4.2.3 Modelo Para Partição Mensal

Na Figura 12, está representado o modelo de regressão linear simples para estimativa da irradiação PAR, em função da irradiação solar global com partição mensal (mês de janeiro). Observa-se uma boa distribuição dos pontos ao longo da reta, variando no intervalo de 13,22 MJ/m<sup>2</sup> a 31,25 MJ/m<sup>2</sup> para a irradiação global e 4,60 MJ/m<sup>2</sup> a 10,07 MJ/m<sup>2</sup> para a irradiação PAR, com concentração no intervalo de 26 MJ/m<sup>2</sup> a 32 MJ/m<sup>2</sup>.



**Figura 12** Curva de regressão linear simples, para estimativa da irradiação PAR em função da irradiação global em  $\text{MJ/m}^2$  para o mês de janeiro.

Pode-se observar que a reta de regressão, indicada na Figura 12 não passa pela origem e apresenta um coeficiente linear ( $\beta$ ) positivo de 0,26 e coeficiente angular ( $\alpha$ ) de 0,34 em janeiro, o que leva a uma superestimação da irradiação PAR quando a irradiação global incidente tende a ser zero ( $\text{PAR} = 0,26 \text{ MJ/m}^2$ ). O mesmo fato ocorreu para os meses de fevereiro ( $\beta = 0,38$ ), março ( $\beta = 0,38$ ), maio ( $\beta = 0,13$ ), junho ( $\beta = 0,16$ ), julho ( $\beta = 0,11$ ), agosto ( $\beta = 0,12$ ), setembro ( $\beta = 0,23$ ), outubro ( $\beta = 0,44$ ), novembro ( $\beta = 0,44$ ) e dezembro ( $\beta = 0,03$ ); já no mês de abril, o coeficiente linear ( $\beta$ ) foi negativo (-0,09) e o angular foi de 0,40, o que leva a uma subestimação da irradiação PAR, ou seja, quando a irradiação global incidente na superfície é zero a PAR é negativa.

Realizando a análise de variância dos dados para a obtenção das estatísticas de avaliação ( $R^2$ , R e teste F de Snedecor) e teste t-Student ao nível de 5% de significância para o coeficiente linear, verifica-se que o mesmo é não significativo para todos os meses do ano, exceto o mês de junho que apresentou

coeficiente linear positivo de  $0,16\text{MJ/m}^2$ . Então foi efetuado um novo ajuste, forçando a reta passar pela origem, reduzindo a equação  $R_{\text{PAR}} = 0,29 \cdot R_{\text{glo}}$ .

**Tabela 3** Equação após teste de significância, média dos percentuais individuais e percentual da somatória para o modelo III

PARTIÇÃO	EQUAÇÃO	MÉDIA MENSAL DOS PERCENTUAIS INDIVIDUAIS	PERCENTUAL DA SOMATÓRIA MENSAL
Janeiro	$R_{\text{PAR}} = 0,35 \cdot R_{\text{glo}}$	0,35	0,35
Fevereiro	$R_{\text{PAR}} = 0,39 \cdot R_{\text{glo}}$	0,41	0,40
Março	$R_{\text{PAR}} = 0,37 \cdot R_{\text{glo}}$	0,39	0,39
Abril	$R_{\text{PAR}} = 0,41 \cdot R_{\text{glo}}$	0,40	0,40
Maiο	$R_{\text{PAR}} = 0,33 \cdot R_{\text{glo}}$	0,36	0,35
Junho	$R_{\text{PAR}} = 0,29 \cdot R_{\text{glo}}$	0,31	0,30
Julho	$R_{\text{PAR}} = 0,28 \cdot R_{\text{glo}}$	0,30	0,29
Agosto	$R_{\text{PAR}} = 0,36 \cdot R_{\text{glo}}$	0,37	0,37
Setembro	$R_{\text{PAR}} = 0,40 \cdot R_{\text{glo}}$	0,42	0,42
Outubro	$R_{\text{PAR}} = 0,35 \cdot R_{\text{glo}}$	0,37	0,37
Novembro	$R_{\text{PAR}} = 0,36 \cdot R_{\text{glo}}$	0,37	0,37
Dezembro	$R_{\text{PAR}} = 0,33 \cdot R_{\text{glo}}$	0,33	0,33

Comparando a média mensal dos percentuais individuais ( $\Delta(i)$ ) e do percentual da somatória mensal ( $\Delta(s)$ ), indicado na Tabela 3, verifica-se que variaram de  $0,30\text{MJ/m}^2$  a  $0,42\text{ MJ/m}^2$  e  $0,29\text{ MJ/m}^2$  a  $0,42\text{ MJ/m}^2$ , respectivamente, diferindo do valor obtido para o coeficiente angular do modelo III, em menos de 9%.

Os coeficientes angulares das equações dos meses de janeiro ( $\alpha = 0,35$ ) e dezembro ( $\alpha = 0,33$ ) não apresentaram variação em relação a média mensal dos percentuais individuais e dos percentuais das somatórias individuais. Já nos meses de março ( $\alpha = 0,37$ ), agosto ( $\alpha = 0,36$ ), setembro ( $\alpha = 0,40$ ), outubro ( $\alpha = 0,35$ ) e novembro ( $\alpha = 0,36$ ) os percentuais não apresentaram diferença entre si, mas diferiram dos coeficientes angulares, sendo: 5,13%, 2,70%, 4,76%, 5,41% e 2,70% maiores, respectivamente.

Para os meses de fevereiro ( $\alpha = 0,39$ ), maio ( $\alpha = 0,33$ ), junho ( $\alpha = 0,29$ ) e julho ( $\alpha = 0,28$ ), ocorreram diferenças nos dois percentuais, sendo os coeficientes angulares 4,88%, 8,33%, 6,45% e 6,67% respectivamente menores que as médias mensais dos percentuais individuais (com maior discrepância no mês de maio) e 2,50%, 5,71%, 3,33% e 3,45% respectivamente menores que o percentual da somatória mensal. A equação do mês de abril foi a única que apresentou coeficiente angular superior aos índices percentuais, que não diferenciaram entre si, sendo 2,5% maior.

Fazendo um estudo de limite nas equações, verificou-se que a irradiação PAR tende a zero, quando a irradiação global tende a zero (coeficiente linear nulo) em todos os meses. Já o limite máximo de irradiação solar PAR, quando a irradiação global tende a 100% da irradiação máxima atingida no topo da atmosfera varia mensalmente sendo no mês de: janeiro de 13,27 MJ/m<sup>2</sup>; fevereiro de 14,76 MJ/m<sup>2</sup>; março de 14,11 MJ/m<sup>2</sup>; abril de 15,45 MJ/m<sup>2</sup>; maio de 12,74MJ/m<sup>2</sup>; junho de 11,04 MJ/m<sup>2</sup>; julho de 13,77 MJ/m<sup>2</sup>; agosto de 13,77MJ/m<sup>2</sup>; setembro de 15,33 MJ/m<sup>2</sup>; outubro de 13,27 MJ/m<sup>2</sup>; novembro de 13,62 MJ/m<sup>2</sup> e dezembro de 12,47 MJ/m<sup>2</sup>.

#### 4.2.4 Modelo em Função do Tipo de Cobertura do Céu

Na Figura 13, está representada a curva de regressão linear simples com céu nublado. Foi considerado céu nublado os índices de claridade  $k_t$  compreendidos entre  $0 < k_t < 0,3$ , ocorrendo em 57 dias do período analisado; parcialmente nublado os índices de claridade  $k_t$  compreendidos entre  $0,3 \leq k_t \leq 0,65$ , ocorrendo em 104 dias do período; e céu limpo para os índices de claridade  $k_t$  compreendidos entre  $0,65 < k_t < 1,0$ , sendo o de maior ocorrência, com 205 dias.

Observa-se na figura 1 uma boa distribuição dos pontos, variando no intervalo de 0,15 MJ/m<sup>2</sup> a 4,30 MJ/m<sup>2</sup> para a radiação PAR e 0,36 MJ/m<sup>2</sup> a 10,53 MJ/m<sup>2</sup> para a irradiação solar global. Nos demais tipos de cobertura, foram encontrados uma distribuição de energia variando no intervalo de 1,99 MJ/m<sup>2</sup> a

9,73 MJ/m<sup>2</sup> para a componente PAR e 6,74 MJ/m<sup>2</sup> a 24,34 MJ/m<sup>2</sup> para a global com céu parcialmente nublado e 3,65 MJ/m<sup>2</sup> a 12,08 MJ/m<sup>2</sup> para a componente PAR e 13,65 MJ/m<sup>2</sup> a 31,50 MJ/m<sup>2</sup> para a componente global com céu limpo.

**Figura 13** Curva de regressão linear simples, com céu nublado, para estimativa da irradiação PAR em função da irradiação global, em MJ/m<sup>2</sup>.

A reta de regressão, indicada na Figura 13, não passa pela origem e apresenta um coeficiente linear ( $\beta$ ) negativo de -0,03 e coeficiente angular ( $\alpha$ ) de 0,45, o que leva a uma da irradiação PAR negativa, quando a irradiação global incidente tende a ser zero. O mesmo fato ocorreu para céu parcialmente nublado com  $\beta = -0,53$  e céu limpo com  $\beta = -0,68$ .

Após o teste da estatística t-Student de nulidade para o coeficiente linear, o mesmo foi rejeitado em todas as equações, obtendo assim as equações para o modelo IV apresentados na Tabela 4.

O coeficiente angular variou de 0,39 para céu limpo, 0,40 para céu parcialmente nublado e 0,45 para céu nublado, indicando que a radiação solar PAR incidente na superfície em função do tipo de cobertura do céu variou de 39% a 45% da irradiação solar global incidente na superfície. Esses valores são próximos aos encontrados por ASSUNÇÃO (1995), que obteve valores médios em torno de 0,41 para dias limpos, 0,429 para dias parcialmente nublados e 0,496 para dias nebulosos para o município de Piracicaba, Estado de São Paulo.

**Tabela 4** Equação após teste de significância, média dos percentuais individuais e percentual da somatória para o modelo IV

TIPO DE COBERTURA	EQUAÇÃO	MÉDIA DOS PERCENTUAIS INDIVIDUAIS	PERCENTUAL DA SOMATÓRIA
Nublado	$R_{PAR} = 0,45 * R_{glo}$	0,44	0,45

Parcialmente nublado	$R_{PAR} = 0,40 * R_{glo}$	0,40	0,39
Limpo	$R_{PAR} = 0,39 * R_{glo}$	0,40	0,40

Comparando os valores obtidos para o coeficiente angular do modelo IV, indicado na Tabela 4, conclui-se que diferiu em menos de 3% dos valores obtidos através da média dos percentuais individuais ( $\Delta(i)$ ) e do percentual da somatória ( $\Delta(s)$ ) em função do tipo de cobertura.

O coeficiente angular para equação com céu nublado ( $\alpha = 0,45$ ) foi 2,27% maior que a média dos percentuais individuais, e igual ao percentual da somatória; já para céu parcialmente nublado, o coeficiente angular da equação ( $\alpha = 0,40$ ) foi 2,56% maior que o percentual da somatória, sendo igual para a média dos percentuais individuais. Avaliando o coeficiente angular da equação para céu limpo ( $\alpha = 0,39$ ), verifica-se que foi 2,5% menor que os índices percentuais, que não diferiram entre si.

Fazendo um estudo de limite nas equações, verificou-se que a radiação PAR tende a zero quando a irradiação global tende a zero (coeficiente linear nulo), em todos os meses. Já o limite máximo de irradiação solar PAR, quando a irradiação global tende a 100% da irradiação máxima atingida no topo da atmosfera, foi para céu nublado de 15,10 MJ/m<sup>2</sup>; parcialmente nublado de 14,72MJ/m<sup>2</sup> e céu limpo de 13,96 MJ/m<sup>2</sup>.

### 4.3 VALIDAÇÃO DO MODELO

#### 4.3.1 Partição Anual

Na Tabela 5, são apresentados as médias dos valores medidos ( $R_{PARmed}$ ) e valores estimados ( $R_{PARest}$ ) da irradiação solar PAR, os indicadores estatísticos média dos erros  $|\Delta|(\%)$ , desvio padrão médio residual ( $St$ ) e índice de correlação ( $R$ ) para irradiação PAR real e irradiação PAR medida pelo modelo obtido após o teste t. O modelo apresenta um erro médio de 3,35%, sendo este considerado

baixo, com desvio padrão médio residual não elevado, chegando a uma dispersão de  $\pm 0,90 \text{ MJ/m}^2$ . A diferença de irradiação entre a média dos valores estimados e medidos foi de apenas  $0,17 \text{ MJ/m}^2$ .

**Tabela 5** Média dos valores reais ( $R_{\text{PARmed}}$ ) e estimados ( $R_{\text{PARest}}$ ) da irradiação PAR, média dos erros  $|\Delta|(\%)$ , desvio padrão médio residual (St) e índice de correlação (R), para partição anual

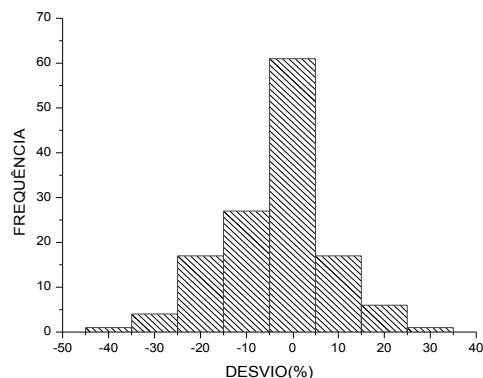
PARTIÇÃO	$R_{\text{PARmed}}$ (MJ/M <sup>2</sup> )	$R_{\text{PARest}}$ (MJ/M <sup>2</sup> )	$ \Delta (\%)$	St(MJ/m <sup>2</sup> )	R
Anual	7,73	7,56	3,35	0,90	0,96

As correlações obtidas entre os valores estimados através do modelo e medidos da componente PAR, bem como a reta ideal 1:1 (com  $45^\circ$  de inclinação) estão expressos na Figura 14(a). A figura apresenta, também, a respectiva frequência de ocorrência de desvios para o modelo, Figura 14(b).

Verifica-se através da Figura 14(a), baixo espalhamento dos pontos ao redor da reta ideal (1:1), observado pelo índice de correlação R da Tabela 5, que foi próximo de um, indicando excelente predição do modelo. Observa-se através da figura 14(b), uma variação de -39,66% a 26,03% para os erros médios diários, havendo maior concentração no intervalo de -5% a 5% com 45,52% dos erros. Nos demais intervalos, a frequência dos erros foram: entre 5% a 26,03% com 17,91% e entre -39,66% a -5% com 36,57%, sendo observados nesse intervalo o de maior variação. O modelo possui tendência de subestimar a irradiação solar PAR, pois 62,96% dos dados estão no intervalo negativo.



(a).



(b)

**Figura 14** (a) Correlação entre as componentes da irradiação PAR medida e estimada pela equação de regressão; (b) Distribuição de frequência dos erros médios diários. Período de validação do modelo I.

#### 4.3.2 Partição Sazonal

Na Tabela 6, são apresentados as médias dos valores medidos ( $R_{PARmed}$ ) e valores estimados ( $R_{PARest}$ ) da irradiação solar PAR, os indicativos estatísticos média dos erros  $|\Delta|(\%)$ , desvio padrão médio residual ( $St$ ) e índice de correlação ( $R$ ) para irradiação PAR real e irradiação PAR medida pelo modelo obtido, após o teste t, com partição sazonal.

A menor incidência de irradiação solar PAR estimada e real ocorreu no equinócio de outono e a maior para o solstício de verão com diferença média de  $0,64 \text{ MJ/m}^2$ . Já para o solstício de inverno e equinócio de primavera, encontramos uma variação intermediária, com diferenças médias de  $1,12 \text{ MJ/m}^2$  e  $0,18 \text{ MJ/m}^2$  respectivamente. O modelo apresenta um erro médio de estimativa, variando de  $1,41\%$  a  $15,95\%$ , sendo considerado de grande amplitude, com desvio padrão médio residual de  $0,58 \text{ MJ/m}^2$  a  $1,36 \text{ MJ/m}^2$ .

**Tabela 6** Média dos valores reais ( $R_{PARmed}$ ) e estimados ( $R_{PARest}$ ) da irradiação PAR, média dos erros  $|\Delta|(\%)$ , desvio padrão médio residual ( $St$ ) e índice de correlação ( $R$ ), para partição sazonal

ESTAÇÃO	$R_{PARmed}$ ( $\text{MJ/m}^2$ )	$R_{PARest}$ ( $\text{MJ/m}^2$ )	$ \Delta (\%)$	$St(\text{MJ/m}^2)$	$R$
---------	----------------------------------	----------------------------------	----------------	---------------------	-----

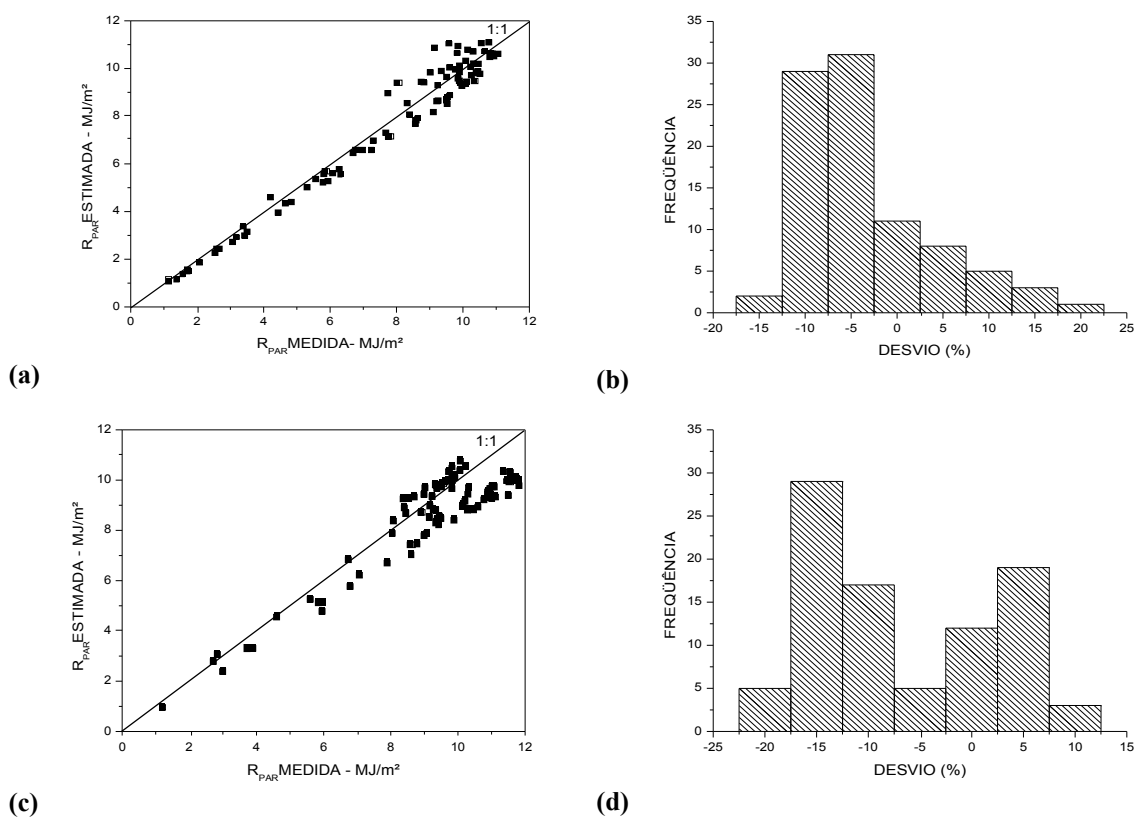
Primavera	7,77	7,59	3,36	0,58	0,98
Verão	9,15	8,51	6,83	1,05	0,93
Outono	4,83	4,83	1,41	0,61	0,96
Inverno	7,59	6,47	15,95	1,36	0,98

As correlações obtidas entre os valores estimados através do modelo e medidos da componente PAR com partição sazonal, bem como a reta ideal 1:1 (com 45° de inclinação), são apresentados na Figura 15(a), (c), (e) e (g) e a frequência de ocorrência de desvios para o modelo na Figura 15(b), (d), (f) e (h).

Verifica-se através de 15(a) baixo espalhamento dos pontos para a equação de estimativa no equinócio de primavera, observado pelo índice de correlação R da Tabela 6 que foi de 0,98, sendo este valor o mesmo apresentado pela equação no solstício de inverno, Figura 15(g). Na equação do solstício de verão, Figura 15(c), observamos o menor índice de correlação R que foi de 0,93 e o intermediário para equinócio de outono que foi de 0,96, Figura 15(e). Verifica-se em todas as equações que o valor da correlação é muito próxima de 1, indicando excelente ajustamento entre os valores medidos e estimados.

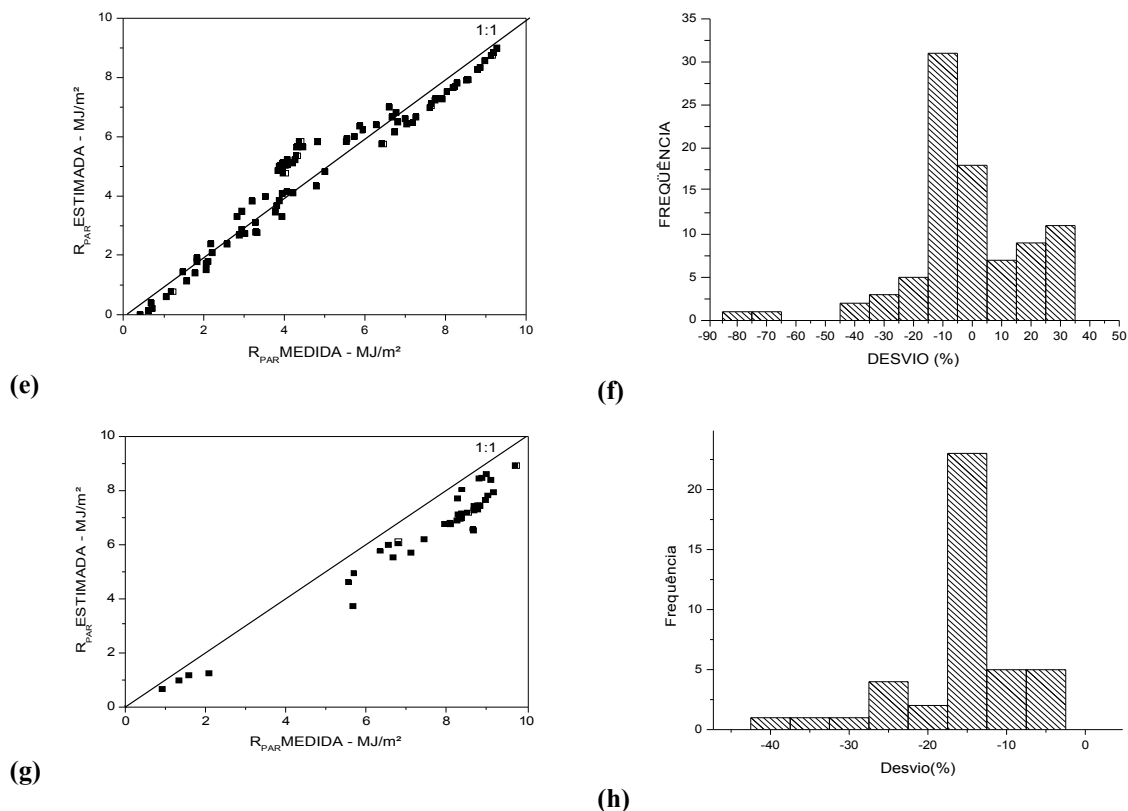
Observa-se através da Figura 15(b), uma variação de -15,62% a 18,88% para os erros médios diários na equação da primavera, havendo maior concentração no intervalo de -10% a -5%, com 36,67% dos erros sendo este percentual muito próximo ao observado no intervalo de -5% a 5%, que foi de 35,56%. A Figura 15(d) indica uma variação de -20,44% a 10,65% no verão, havendo maior concentração no intervalo de -20,44% a -10% com 52,75%.

Já no outono, Figura 15(f), encontra-se o intervalo de maior variação para os erros médios diários em decorrência da baixa irradiação em alguns dias analisados, sendo a amplitude de -79,97% a 32,25%, havendo maior concentração no intervalo de -15% a -5% com 36,36%. No inverno, ocorreu uma variação no intervalo negativo de -40,08% a -4,25% para os erros médios diários, Figura 15(h), havendo maior concentração no intervalo de -20% a -10% com 61,90% dos erros. O modelo possui tendência de subestimar a irradiação solar PAR em todas as equações, pois os desvios residuais concentram-se no intervalo negativo.



**Figura 15**

Correlação entre as componentes da irradiação PAR medida e estimada pela equação de regressão e a frequência de ocorrência de desvios para o modelo na primavera (a) e (b); verão (c) e (d); outono (e) e (f) e inverno (g) e (h). Período de validação do modelo II.



**Figura 15** Continuação.

### 4.3.3 Partição Mensal

Na Tabela 7, são apresentados as médias dos valores medidos ( $R_{PARmed}$ ) e valores estimados ( $R_{PARest}$ ) da irradiação solar PAR, os indicativos estatísticos média dos erros  $|\Delta|(\%)$ , desvio padrão médio residual ( $St$ ) e índice de correlação ( $R$ ) para irradiação PAR real e irradiação PAR medida pelo modelo obtido, após o teste t, com partição mensal.

A menor incidência de radiação solar PAR estimada e real ocorreu nos meses de maio junho e julho com diferenças médias de  $0,05 MJ/m^2$  e  $0,11 MJ/m^2$  respectivamente; já a maior, nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro, com diferença média  $0,21 MJ/m^2$ ,  $0,02 MJ/m^2$  e  $0,38 MJ/m^2$  respectivamente, e intermediária nos demais meses.

**Tabela 7** Média dos valores reais ( $R_{PARmed}$ ) e estimados ( $R_{PARrest}$ ) da irradiação PAR, média dos erros  $|\Delta|$ (%), desvio padrão médio residual (St) e índice de correlação (R), para partição mensal

MÊS	$R_{PARmed}$ (MJ/m <sup>2</sup> )	$R_{PARrest}$ (MJ/m <sup>2</sup> )	$ \Delta $ (%)	St(MJ/m <sup>2</sup> )	R
Janeiro	9,74	9,72	1,46	0,44	0,82
Fevereiro	9,95	9,57	4,16	0,57	0,99
Março	8,24	7,86	4,95	0,41	0,99
Abril	6,34	6,44	1,72	0,70	0,97
Mai	3,16	3,03	5,65	0,80	0,98
Junho	3,09	3,14	3,20	0,45	0,95
Julho	3,10	2,99	4,71	0,51	0,98
Agosto	7,81	6,30	7,74	0,28	0,99
Setembro	7,39	7,19	4,17	0,26	0,99
Outubro	7,51	7,05	7,09	0,12	0,99
Novembro	7,94	7,91	1,35	0,27	0,99
Dezembro	8,46	8,25	2,79	1,58	0,96

O modelo apresentou um erro médio de estimativa variando de 1,35% a 7,74%, sendo os de maiores índices nos meses de agosto e outubro e os de menores nos meses de janeiro e novembro. O desvio padrão médio residual variou de 0,12 MJ/m<sup>2</sup> a 1,58 MJ/m<sup>2</sup>, sendo o mês de dezembro o de maior discrepância.

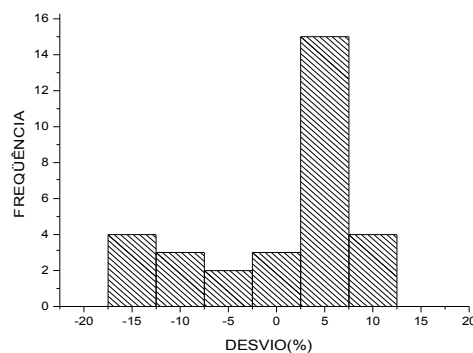
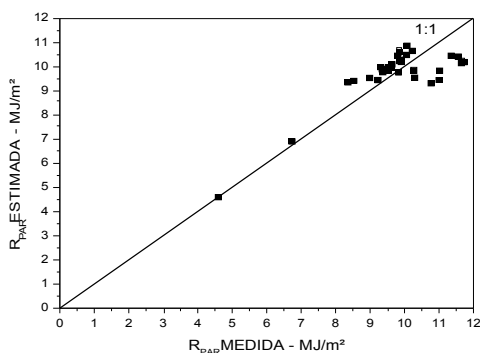
As correlações obtidas entre os valores estimados através do modelo e medidos da componente PAR com partição mensal, bem como a reta ideal 1:1 (com 45° de inclinação), são apresentados na Figura 16(a), (c), (e), (g), (i), (k), (m), (o), (q), (s), (u), (x) e a frequência de ocorrência de desvios para o modelo na Figura 16(b), (d), (f), (h), (j), (l), (n), (p), (r), (t), (v), (z), seguindo a ordem: janeiro, fevereiro, março, abril, maio, junho, julho, agosto, setembro, outubro, novembro, dezembro.

Verifica-se através da Figura 16(a), que no mês de janeiro, ocorreu um comportamento tendencioso entre os valores medidos e estimados, indicado pelo  $R = 0,82$ , sendo o mais baixo entre as equações com divisão mensal, mas pela análise do desvio do resíduo o erro gerado não passa de 1,46%. Nos meses restantes, encontramos altos valores para a correlação entre a PAR medida e

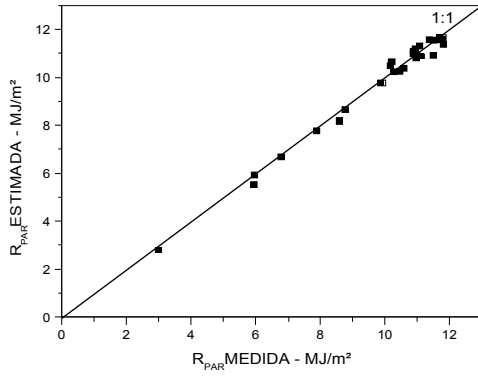
estimada, variando entre 0,95 e 0,99, indicando um excelente ajustamento observável na Figura 16.

A maior variação dos erros ocorreu no mês de junho, Figura 16(k), variando no intervalo de -7,82% a 22,69% e menor para o mês de fevereiro, com variação no intervalo de -7,02% a 4,83%, figura 4.13(r). Para os demais meses, as variações foram: de -14,77% a 11,93% para janeiro; de -14,39% a 5,33% para março; -2,80% a 13,87% para abril; -15,72% a 9,99% para maio; de -19,68% a 8,09 para julho; -19,62 a 4,60% para setembro; de -11,93% a 4,32% para outubro; de -13,68% a 8,29% para novembro e de -14,18% a 11,39% para dezembro. O comportamento de variação dos erros no mês de agosto apresentou apenas valores negativos variando no intervalo de -41,22% à -15,18%.

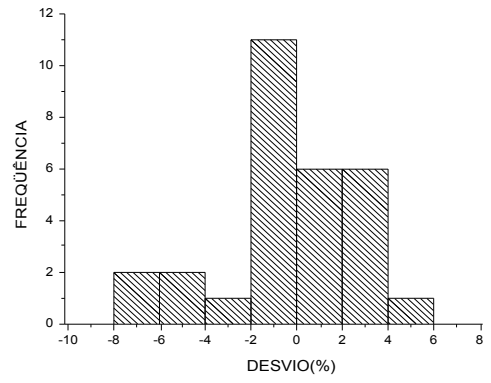
O modelo subestima a irradiação solar PAR para os meses de fevereiro, março, abril, maio, julho, agosto, setembro, outubro, novembro e dezembro e superestima para os meses de janeiro e junho.



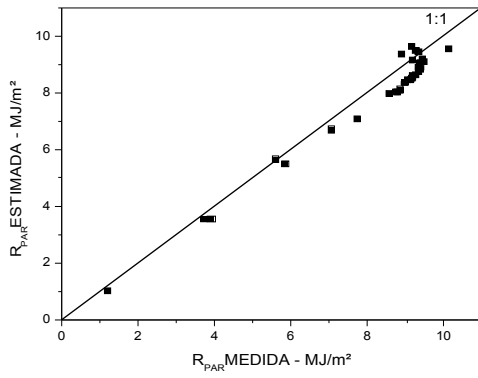
(a) **Figura 16** Correlação entre as componentes da radiação PAR medida e estimada pela equação e a frequência de ocorrência de desvios de regressão dos meses de: janeiro (a) e (b), fevereiro (c) e (d), março (e) e (f), abril (g) e (h), maio (i) e (j), junho (k) e (l), julho (m) e (n), agosto (o) e (p), setembro (q) e (r), outubro (s) e (t), novembro (u) e (v) e dezembro (x) e (z) para o período de validação do modelo, com partição mensal.



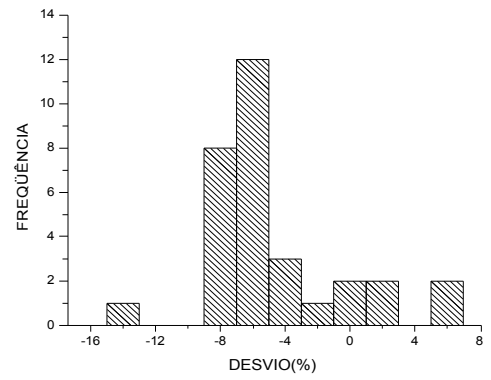
(c)



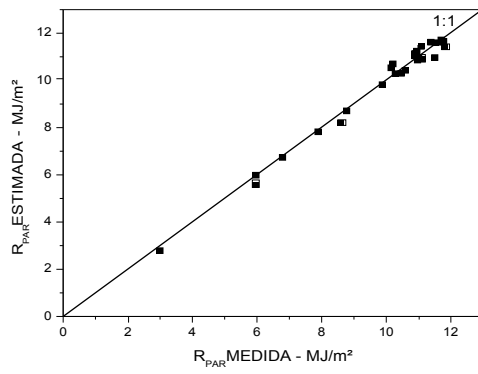
(d)



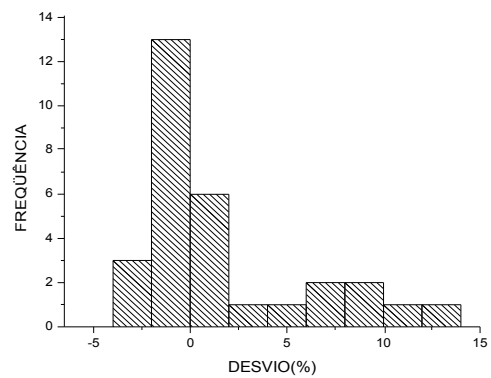
(e)



(f)



(g)



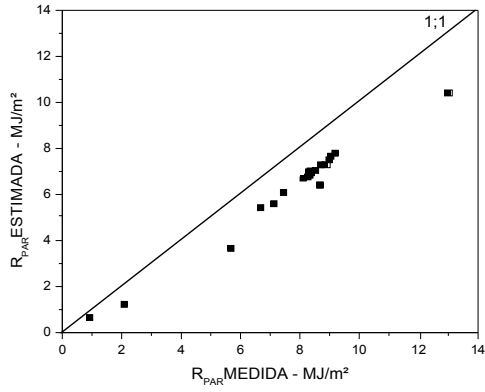
(h)

(i).  
**Figura 16** Continuação.

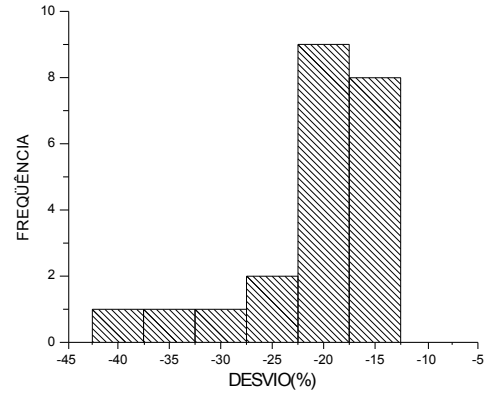
(k).  
 (m).

(j).

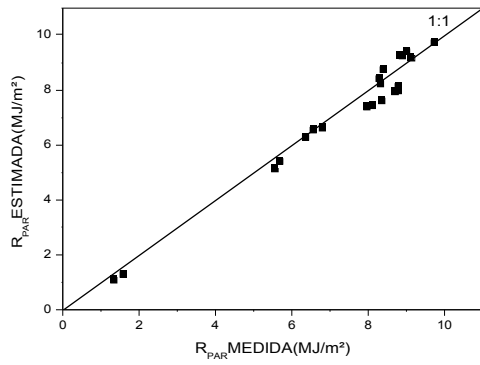
(l).  
 (n).



(o)

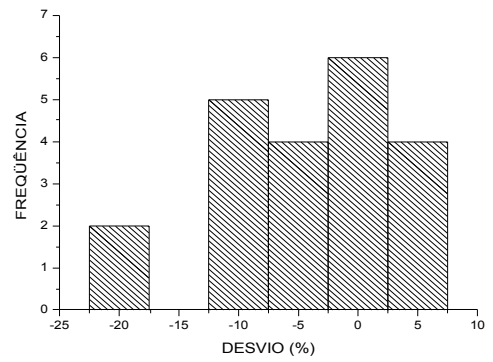


(p)

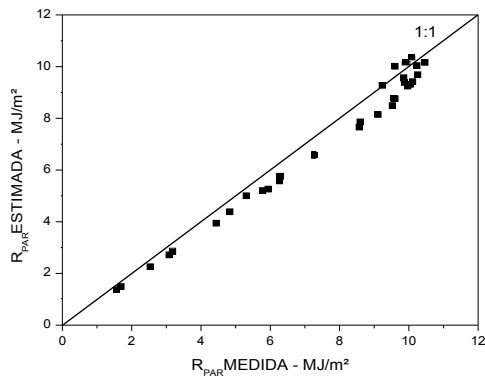


(q)  
Figura 16

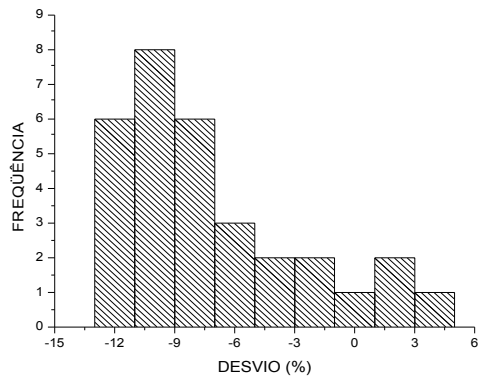
Continuação.



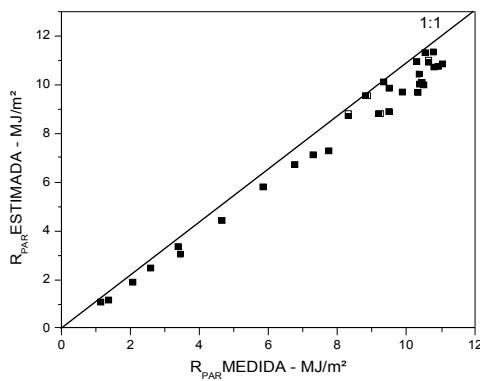
(r)



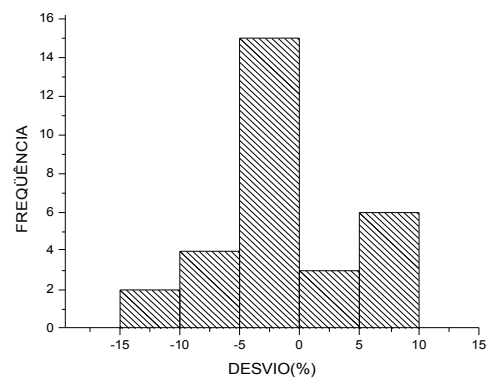
(s)



(t)

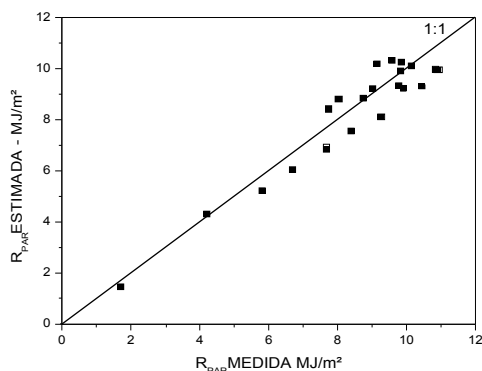


(u)

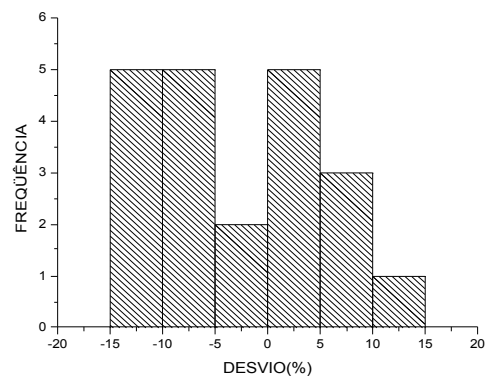


(v)





(x)

**Figura 16** Continuação.

(z)

#### 4.3.4 PAR em Função do Tipo de Cobertura do Céu

Na Tabela 8, são apresentados as médias dos valores medidos ( $R_{PARmed}$ ) e valores estimados ( $R_{PARest}$ ) da irradiação solar PAR, os indicativos estatísticos média dos erros  $|\Delta|(\%)$ , desvio padrão médio residual ( $St$ ) e índice de correlação ( $R$ ) para irradiação PAR real e irradiação PAR medida pelo modelo obtido em função do tipo de cobertura do céu, após o teste t.

A menor incidência de irradiação solar PAR estimada e real ocorreu para céu nublado com diferença média de  $0,10 \text{ MJ/m}^2$  e maior para céu limpo com diferença média de  $0,32 \text{ MJ/m}^2$ , o que era de se esperar, pois a ocorrência de nuvens auxilia na absorção e espalhamento da energia na atmosfera. O modelo apresenta um erro médio de estimativa, variando de  $2,62\%$  para céu parcialmente nublado a  $6,73\%$  para céu parcialmente com desvio padrão médio residual de  $0,17 \text{ MJ/m}^2$  a  $0,93 \text{ MJ/m}^2$ , sendo o de maior discrepância com céu limpo.

**Tabela 8** Média dos valores reais ( $R_{PARmed}$ ) e estimados ( $R_{PARest}$ ) da irradiação PAR, média dos erros  $|\Delta|(\%)$ , desvio padrão médio residual ( $St$ ) e índice de correlação ( $R$ ), para o tipo de cobertura do céu

ESTAÇÃO	$R_{PARmed}(\text{MJ/m}^2)$	$R_{PARest}(\text{MJ/m}^2)$	$ \Delta (\%)$	$St(\text{MJ/m}^2)$	$R$
Nublado	2,52	2,42	6,73	0,17	0,99
Parcialmente Nublado	6,41	6,57	2,62	0,07	0,89

Limpo	9,44	9,76	2,89	0,93	0,91
-------	------	------	------	------	------

As correlações obtidas entre os valores estimados através do modelo e medidos da componente PAR para o tipo de cobertura do céu, bem como a reta ideal 1:1 (com 45° de inclinação), são apresentados na Figura 17(a), (c) e (e), e a frequência de ocorrência de desvios para o modelo na Figura 17(b), (d) e (f).

Verifica-se através da Figura 17(a) baixo espalhamento dos pontos para a equação de estimativa com céu nublado, observado pelo índice de correlação R da Tabela 8 que foi o mais alto das equações modeladas (0,99), indicando um excelente ajustamento da equação.

Para céu parcialmente nublado, indicado na Figura 17(c), observa-se o menor índice de correlação R que foi de 0,89 sendo próximo do valor encontrado para céu limpo que foi de 0,91, indicado na Figura 17(e). Verifica-se em todas as equações que o valor da correlação é muito próximo de um, indicando excelente ajustamento entre os valores medidos e estimados, apesar da amplitude das correlações das equações do modelo ter sido igual a 0,10.

Observa-se através da Figura 17(b), uma variação de -4,03% a 26,58% para os erros médios diários na equação para céu nublado, havendo maior concentração no intervalo de -5% a 5% com 66,67% dos erros. A Figura 17(d) indica uma variação de -12,93% a 11,50% com céu parcialmente nublado, havendo maior concentração no intervalo de 5% a 10% com 31,03%.

Já para céu limpo, Figura 17(f), encontra-se o intervalo de maior variação para os erros médios diários, sendo a amplitude de -11,93% a 20,64%, havendo maior concentração no intervalo de -12,5% a -7,5%, com 24,66% dos erros, sendo este percentual muito próximo ao observado no intervalo de -2,5% a 2,5%, que foi de 19,18% e de 2,5% a 7,5%, que foi de 20,55% dos erros.

O modelo possui tendência de superestimar a radiação solar PAR em todas as equações, pois os desvios residuais concentram-se no intervalo positivo.

(a).

(b).

(c).  
**Figura 17**

(d).

Correlação entre as componentes da irradiação PAR medida e estimada pela equação de regressão e a frequência de ocorrência de desvios para o modelo com céu nublado (a) e (b), parcialmente nublado (c) e (d) e limpo (e) e (f), para o período de validação do modelo IV.

(e).  
**Figura 17**

(f).

Continuação.

## 5. CONCLUSÃO

- As irradiações diárias, médias mensais e mensais acumuladas para a  $R_{glo}$  e  $R_{PAR}$  tendem a um comportamento semelhante a do topo da atmosfera, mas com grandes variações, sendo que a maior incidência média para  $R_{PAR}$  ocorreu no mês de fevereiro com  $9,95 \text{ MJ/m}^2$  e menor no mês de junho com  $3,09 \text{ MJ/m}^2$ .
- A irradiação solar PAR incidente na superfície local correspondeu a 21,73% da incidente no topo da atmosfera e 37% da global.
- Os valores diários para o índice de claridade apresentaram uma variação no intervalo de 0,05 a 0,83, sendo que 0,83 constitui o limite máximo de claridade para a região de Santa Helena.
- O modelo mais eficaz foi encontrado com a partição em função do tipo de cobertura do céu, onde os coeficientes angulares das equações diferiram em menos de 2,5% das médias percentuais individuais e percentual da somatória, com dispersão de 3,84% para o erro médio.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALADOS-ARBOLEDAS, L. et al. **Parametric models to estimate photosynthetically active radiation in Spain.** Agricultural and Forest Meteorology, 101, p. 187-201, 2000.

ALADOS, I. et al. **Improved estimation of diffuse photosynthetically active radiation using two spectral models.** Agricultural and Forest Meteorology. New York. v.111, p.1-12, 2002.

ALADOS, I., ALADOS-ARBOLEDAS, L. **Direct and diffuse photosynthetically active radiation: measurements and modelling.** Agricultural and Forest Meteorology, v.93, p. 27-28, 1999.

ALADOS, I.; FOYO-MORENO, I.; ALADOS-ARBOLEDAS, L. **Photosynthetically active radiation: measurements and modelling.** v. 78, p.121-131, 1996.

ALVALÁ, R. C. dos S.; SILVA, F. W. C. **Relação entre a radiação fotossinteticamente ativa e irradiância de onda curta em área de policultivo na Amazônia.** In: Anais do XI CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, Rio de Janeiro, p. 2453-2462. 2000 (CD-ROM).

ANGSTROM, A. **Solar and terrestrial radiation.** Q. J. R. Meteorology Society, p. 121-125, 1924.

ASSIS, F. N.; MENDEZ, M. E. G. **Relação entre a radiação fotossinteticamente ativa e radiação global.** Pesquisa agropecuária brasileira. V.24, p.797-800, 1989.

ASSUNÇÃO, H. F. **Relações entre a radiação fotossinteticamente ativa e a radiação solar global em Piracicaba, SP.** Tese. Escola Superior de Agricultura Luiz Queiroz/USP, Piracicaba. p.41, 1995.

ASSUNÇÃO, H. F.; BARBIERI, V. **Estimativa da radiação fotossinteticamente ativa e a sua distribuição espectral horária para Piracicaba-SP.** In... Anais do IX CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, Campina Grande, PB, p. 286-289, 1995.

ATROCH, E. M. A. C. et al. **Crescimento, teor de clorofilas, distribuição de biomassa e característica anatômicas de plantas jovens de *Bauhinia forficata* submetidas à diferentes condições de sombreamento.** Ciência e Agrotecnologia. Lavras. v.25. p.853-862, 2001.

BAKER, K. S.; FROUIN, R. **Relation between photosynthetically available radiation and total insolation at the surface under clear skies.** Limnol Oceanograph. V.32, p.1370-1377, 1987.

BLACKBURN, W. J.; PROCTOR, J. T. A. **Estimating photosynthetically active radiation from measured solar irradiance.** Solar Energy, 31, p. 233-234. 1983.

BRITTON, C. M.; DODD, J. D. **Relationships of photosynthetically active radiation and shortwave irradiance.** Agricultural Meteorology, v. 17, p. 1-7, 1976.

BUREK, S. A. M.; NORTON, B.; PROBERT, D. **Analytical and experimental methods for shadowband correction for solarimeters on inclined planes under isotropically diffuse and overcast skies.** Sol. Ener., v. 40, p. 151-60, 1988.

DUFFIE, J. H.; BECKMAN, W. H. **Solar engineering of thermal processes.** New York: Wiley Interscience, 1980.

FAGUNDES, R. S.; QUALLIO, S.; RICIERI, R. P. **Modelo de estimativa da irradiação solar fotossinteticamente ativa para a cidade de Santa Helena-PR, com partição sazonal.** In: II ENDITEC – ENCONTRO NACIONAL DE DIFUSÃO TECNOLÓGICA, 2005, Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Medianeira - Medianeira. Anais... II ENDITEC – Encontro nacional de Difusão tecnológica, 2005. 1 CD-ROM.

FRANÇA, S. et al. **Radiação fotossinteticamente ativa e sua relação com a radiação solar global em dossel de alfafa, em função da área foliar.** Revista Brasileira de Agrometeorologia. v.5, p.147-153, 1997.

FRANÇA, S.; BERGAMASHI, H.; ROSA, L. M. G. **Modelagem do crescimento de milho em função da radiação fotossinteticamente ativa e o acúmulo de graus-dias, com e sem irrigação.** Revista Brasileira de Agrometeorologia. V.7, n.1, p.59-66, 1999.

FRISINA, V. A.; ESCOBEDO, J. F.; GOMES, E. N. **Estimativa da radiação fotossinteticamente ativa (PAR) em estufa de polietileno.** Encontro de Energia no Meio Rural. Campinas, p. 37-46, 2000.

FRISINA, V. A. **Modelagem das radiações global, difusa e fotossinteticamente ativa em ambiente protegido e suas relações com crescimento e produtividade da cultura de pimentão (*capsicum annum L.*).** São Paulo, 2002. 108 p. Tese (Doutorado em .....). Faculdade de Ciências Agrônômicas, campus Botucatu, Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”.

GAASTRA, P. **Photosynthesis of crop plants as influenced by light, carbondioxide, temperature and stomatal difusion resistance.** Meded. Landbouwhogesh. Wagening, v.59, p.1-68, 1959.

GONZÁLEZ, J. A.; CALBÓ, J. **Modelled and measured ratio of PAR to global radiation undes cloudless skies.** Agricultural and Forest Meteorology. New York. v. 110. p. 319-325, 2002.

GOMES, E. N. et al. **Modelo da radiação direta fotossintética horária.** In: congresso Brasileiro de Meteorologia, 11, 2000, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2000 (Editado em CD-ROM).

GOMES, E. N. **Medida e modelos da radiação fotossinteticamente ativa global, direta na incidência e horizontal – Tese (Mestrado).** Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, campus Botucatu, São Paulo. p.81-83, 2002.

GRANT, R. H.; HEISLER, G. M.; GAO, W. **Photosynthetically Active Radiation: sky radiance distributions under clear and overcast conditions.** Agricultural and Forest Meteorology. v. 82, p. 267-292, 1996.

HALL, D. O.; RAO, K. K.; **Photosynthesis.** Ed. Edward Arnold Publishers, Ltd. Inglaterra. p.1-58, 1978.

HIPPS, L. E.; ASRAR, G.; KANEMASU, E. T. **Assessing the interception of photosyntetically active radiation in winter wheat.** Agricultural and Meteorology. v.28, p.253-259, 1983.

HOFFMANN, R.; VIEIRA, S. **Análise de regressão, uma introdução à econometria.** São Paulo: Hucitec. 379p, 1998.

HOWELL, T. A.; MEEK, D. W. **Relationship of Photosynthetically Active Radiation to Shortwave Radiation in the San Joaquin Valley.** Agricultural Meteorology. v. 28, p. 157-175, 1983.

IQBAL, M. **An introduction to solar radiation.** Editora Academic Press. New York. p.387, 1983.

KARALIS, J. D. **Characteristics of direct photosynthetically active radiation.** Agricultural and Forest Meteorology., v.48, p.225-234, 1989.

KLOSOWSKI, E. S. et al. **Modelo de estimativa da insolação diária para Maringá-PR.** In – XI CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA. II REUNIÃO LATINO-AMERICANA DE AGROMETEOROLOGIA. **Anais...CD-ROM.** Florianópolis 1999. pg.687-692.

LI-COR INSTRUMENTS. **Radiation measurement instruments: Radiometers, PAR sensors, Dataloggers, Spectroradiometers, Photometers.** Lincoln, 24p. (catálogo) , 1991.

MARTINEZ-LOZANO, A. A.; ONRUBIA, J. E.; DE LA RUBIA, J. **The Historical evolution of the Ångstrom fórmula and its modificações: review and bibliography.** Agricultural and Forest Meteorology. V33. p.109-128, 1984.

McCREE, K. J. **A solarimeter for measuring photosynthetically active radiation.** Agric. Meteorol. 3:353-363, 1966.

\_\_\_\_\_. **The action spectrum, absorbance and quantum yield of photosynthesis in crop plants.** Agricultural Meteorology, 9, p.191-219, 1972.

\_\_\_\_\_. **The measurement of photosynthetically active radiation.** Solar Energy, v. 15, p. 83-87, 1973.

MEEK, D. W. et al. **A generalized relationship between Photosynthetically Active Radiation and Solar Radiation.** Agronomy Journal. v.76, p. 939-945, 1984.



MONTEITH, J. L. **Solar radiation and productivity in tropical ecosystems.** Journal of Applied Ecology, 9, 747-766, 1972.

MOON, P. **Proposed solar-radiation curves for engineering use.** J. Franklin Inst., 230, 583-618. 1940.

MOTA, F. S. **Meteorologia Agrícola.** São Paulo: Nobel. p. 63-141, 1985.

OMETTO, J. C. **Bioclimatologia Vegetal.** São Paulo: Agronômica Ceres. p. 1-86, 1981.

PAPAIIOANNOU, G.; PAPANIKOLAOU, N.; RETAILS, D. **Relationships of photosynthetically active radiation and shortwave radiation.** Theor. Appl. Climatol. V.48, p. 23-27, 1996.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações.** Guaíba: Agropecuária. 478p, 2002.

PEZZOPANE, J.E.M., PEDRO JÚNIOR, M.J., ORTOLANI, A.A.; MEYER, N. **Radiação líquida e temperatura de folha no interior de estufa com cobertura plástica, durante o período noturno.** Revista Brasileira de Agrometeorologia. v. 3, p. 1-4, 1995b.

PEZZOPANE, J.E.M.; RIBEIRO, L.G.; LOPES, J.C.; COSTALONGA JR, M.; BERTAZO, C.L. **Radiação solar em cultivo sob tela plástica na região de Alegre, ES.** In: **Anais do X Congresso Brasileiro de Agrometeorologia,** Piracicaba, p. 482-484, 1997.

PRESCOTT, J.A. **Evaporation from water surface in relation to solar radiation.** Trans. R. Soc. Sci. Aust, v.64, p. 114-125, 1940.

RADIN, B. et al. **Eficiência de uso de radiação fotossinteticamente ativa pela cultura do tomateiro em diferentes ambientes.** Pesquisa Agropecuária Brasileira. Brasília. v.38, n.9. p. 1017-1023, 2003.

RAO, C. R. N. **Photosynthetically active components of global solar radiation: mensurements and model computations.** Archs Meteorology, v.34, p. 353-364, 1984.

RAVEN, P. H.; EVERT, R. F.; EICHHORN, S. E. **Biology of Plants, sixth edition.** Ed. W. H. Freeman and company, New York, E.U.A. p. 125-151, 1999.

RICIERI, R. P. **Modelos de estimativas e avaliação dos métodos e medidas de radiação solar difusa**. Tese, 81p. (Doutorado em Agronomia) Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, campus Botucatu, São Paulo. 1998.

ROSS, J.; SULEV, M. **Sources of erros in measurements of PAR**. Agricultural and Forest Meteorology, 100, p. 103-125, 2000.

SCHÖFFEL, E. R.; VOLPE, C. A. **Eficiência de conversão da Radiação fotossinteticamente Ativa interceptada pela soja para a produção de Biomassa**. Revista brasileira de Agrometeorologia. Santa Maria. v.9, n.2. p. 241-249, 2001.

SENTELHAS, P. C.; VILLA NOVA, N. A.; ANGELOCCI, L. R. **Efeito de diferentes tipos de cobertura em mini-estufas na atenuação da radiação solar e da luminosidade**. p. In: **Anais do X CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA**, Piracicaba, p. 479-481. 1997.

SNEDECOR, G. W.; COCHRAN, W. S. **Statistical methods**. 6<sup>a</sup> ed. Ames: Iowa State University, p. 75-93, 1972.

SOUZA, J. L.; ESCOBEDO, J. F. **Balço de radiação em cultivos de feijão-vagem com e sem cobertura de polietileno**. Pesquisa agropecuária brasileira. Brasília, v. 32, n. 1, p. 1-15, 1999.

STANHILL, G.; FUCHS, M. **The relative flux of density photosynthetically active radiation**. J. Appl. Ecol., 14, p. 317-322, 1977.

STIGTER, C. J.; MUSABILHA, V. M. M. **The conservative ratio of Photosynthetically Active to Total Radiation in the Tropics**. Journal of Applied Ecology. v. 19, p. 853-859, 1982.

STONE, R. J. **Improved statistical procedure for evaluation of solar estimation models**. Solar Energy. V.51, 1993, p. 289-291, 1993.

SZEICZ, G. **Field measurements of energy in the 0.4-0.7 micron range. Light as an Ecological Factor**. p. 41-51. Blackwell Scientific Publications, Oxford. 1966.

\_\_\_\_\_. **Solar radiation for plant growth**. J. Appl. Ecol., 11, p. 617-36. 1974.

TEIXEIRA, A. H. C.; LIMA FILHO, J. M. P.; SOARES, J. M. **Transmissão da radiação fotossinteticamente ativa na cultura da videira.** In: Anais do X CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, Piracicaba, p. 526-528. 1997.

TEIXEIRA, A.H.C.; SILVA, B.B.; AZEVEDO, P.V. **Relação entre os fluxos de radiação fotossinteticamente ativa e de radiação solar global, no município de Petrolina-PE.** In... Anais do II Congresso Brasileiro de Biometeorologia, Goiânia, GO, p. 247-250, 1998.

TING, K. C.; GIACOMELLI, G. A. **Availability of Solar Photosynthetically Active Radiation.** Transactions of the ASAE. v. 30, n.5, p. 1453-1457, 1987.

TUBELIS, A.; NASCIMENTO, F. J. L. **Meteorologia descritiva.** São Paulo. Editora Nobel. 374p, 1992.

VALIATI, M. I. **Estimativa da Irradiação Solar Global com diferentes partições para a região de Cascavel – Tese (Mestrado).** UNIOESTE – Universidade Estadual do Oeste do Paraná -, *campus* de Cascavel, Engenharia Agrícola. Paraná. p. 8-15, 2001.

VALIATI, M. I.; RICIARI, R. P.; SANTOS, R. F. **Modelo de Estimativa da irradiação Solar global para a região de Cascavel.** Anais: I SIMPÓSIO DE ENERGIA NA AGRICULTURA, Botucatu: UNESP\_FCA. Gráfica e Editora Tiponic. v.2 p. 395-402, 1999.

VOLTOLINI, J. A.; MENDEZ, M. H. G.; ASSIS, F. N. **Radiação fotossinteticamente ativa transmitida por sombrites comerciais.** In: Anais do X Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, Piracicaba, p. 485-487. 1997.

WHATLEY, J. M.; WHATLEY, F. R. **Light and Plant Life.** Inglaterra: Edward Arnold Publishers Ltd. p. 1-101, 1980.

WILLMOTT, C. J. **On the validation of models. Phisic and geografý.** v.2, p. 209-217, 1976.

YEFIMOVA, N. A. **Geographical distribution of the sums of photosynthetically active radiation.** Soviet Geography: Review and Translation, 12, p. 66-74, 1971.

YOCUM, C. S.; ALLEN, L. H.; LEMON, E. R. **Photosynthesis under field conditions, VI. Solar radiation balance and photosynthesis efficiency.** Agron. J., 46, p. 249-253, 1964.

ZAR, J. H. **Bioestatistical analysis.** 3<sup>a</sup> ed. Upper Saddle River, New York : Prentice Hall. p. 662,1996.