

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU

**ESTIMATIVA DAS RADIAÇÕES ULTRAVIOLETA (UV),
FOTOSSINTÉTICAMENTE ATIVA (PAR) E INFRAVERMELHA (IV)
EM FUNÇÃO DA RAZÃO DE INSOLAÇÃO**

FÁBIO HENRIQUE PIRES CORRÊA

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Câmpus de Botucatu, para a obtenção do título de Mestre em Agronomia (Energia na Agricultura).

BOTUCATU - SP

Novembro - 2011

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU

**ESTIMATIVA DAS RADIAÇÕES ULTRAVIOLETA (UV),
FOTOSSINTÉTICAMENTE ATIVA (PAR) E INFRAVERMELHA (IV)
EM FUNÇÃO DA RAZÃO DE INSOLAÇÃO**

FÁBIO HENRIQUE PIRES CORRÊA

Orientador: Prof. Dr. João Francisco Escobedo

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Câmpus de Botucatu, para a obtenção do título de Mestre em Agronomia (Energia na Agricultura).

BOTUCATU - SP

Novembro – 2011

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

C824e Corrêa, Fábio Henrique Pires, 1985-
Estimativa das radiações ultravioleta (UV),
fotossinteticamente ativa (PAR) e infravermelha (IV) em
função da razão de insolação / Fábio Henrique Pires
Corrêa. - Botucatu : [s.n.], 2011
xi, 69 f. : il. color., gráfs., tabs., fots.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual
Paulista, Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu,
2011

Orientador: João Francisco Escobedo
Inclui bibliografia

1. Insolação. 2. Radiação - Estimativas. 3. Radiação
fotossinteticamente ativa. 4. Radiação infravermelha.
5. Radiação ultravioleta. 6. Radiação solar.
7. Transmissão atmosférica. I. Escobedo, João Francisco.
II. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita
Filho" (Campus de Botucatu). Faculdade de Ciências
Agronômicas. III. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: "ESTIMATIVA DAS RADIAÇÕES ULTRAVIOLETA (UV),
FOTOSSÍNTETICAMENTE ATIVA (PAR) E INFRAVERMELHA (IV)
EM FUNÇÃO DA RAZÃO DE INSOLAÇÃO"

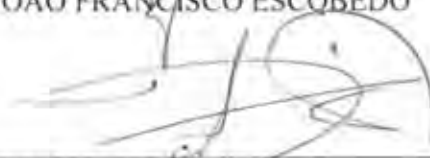
ALUNO: FÁBIO HENRIQUE PIRES CORRÊA

ORIENTADORA: PROF. DR. JOÃO FRANCISCO ESCOBEDO

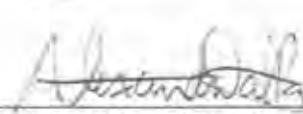
Aprovado pela Comissão Examinadora



PROF. DR. JOÃO FRANCISCO ESCOBEDO



PROF. DR. DINIVAL MARTINS



PROF. DR. ALEXANDRE DAL PAI

Data da Realização: 24 de novembro de 2011.

DEDICO ESTE TRABALHO

Ao meu pai, Carlos Alberto Pires Corrêa, minha mãe Maria Luiza de Camargo Pires Corrêa, meu irmão Luis Gustavo Pires Corrêa e minha namorada Ana Paula Giassetti, por acreditarem no meu potencial, ajudando a contornar dificuldades e impecílios encontrados neste caminho.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me ajudar a concluir mais uma etapa importante de minha vida acadêmica e profissional e a todos os familiares.

Ao grande amigo e orientador Prof. Dr. João Francisco Escobedo, pela oportunidade, apoio e participação em todas as tarefas realizadas durante o todo o processo de aprendizado e pesquisa.

Ao Prof. Dr. Alexandre Dal Pai, grande amigo e braço direito em tudo que desenvolvi durante o curso, onde, sempre esteve me ajudando a resolver problemas e me auxiliando com idéias brilhantes.

Aos professores da Pós-Graduação: Dinival Martins, Carlos Roberto Padovani, Célia Regina Lopes Zimback, Sergio Campos, João Francisco Escobedo, João Eduardo M. Perea Martins, Sérgio Hugo Benez, onde aprendi novos conhecimentos essenciais para minha formação complementar.

Aos amigos do Grupo do Escobedos Ranger's: Adilson Pacheco de Souza, Douglas Rodrigues, Eduardo Nardini Gomes, Rigléia Brauer, Érico Tadao Teramoto, Enzo Dal Pai, Jamile, Luiz Carlos Dall' Antonia Junior, Taiza Rossi, Thiago do Nascimento S. de Almeida, que sempre estiveram presente no convivo do grupo.

Aos meus amigos professores do departamento de Ciências Ambientais: Prof. Dr. Alcides Lopes Leão, Prof. Dr. Dinival Martins, Profa. Dr. Carmen S. Fernandes Boaro, Prof. Dr. Isaac Stringueta Machado, Prof. Dr. Silvio Carlos Santos Nagy, Alcides (Cido) e aos meus amigos Pós-graduando: Humberto Pupo, Paulo Isler, Maria Angélica, Mariana Caldeira, Daniele, Vítor Surian, Vinícius (Eminem), Diego Moraes, Matheus Zorzetto, Juliano Boeck etc, pelo convívio nas disciplinas realizadas durante o curso entre outras atividades.

Aos funcionários: Maria José (secretaria), Debora e Rosana (limpeza), organizando sempre as salas. As pessoas da biblioteca (Ana Lucia Kempinas, Célia Inoue, Maria Lucia e etc) e da fazenda e manutenção (Batista, Anselmo, Márcio, Paulo entre outros), onde todos estavam sempre presentes e disposto a me atender em diversos casos.

Ao CNPq pelo apoio financeiro do início ao fim.

Meus sinceros agradecimentos, até a próxima.

SUMÁRIO

RESUMO.....	1
SUMMARY.....	3
1 INTRODUÇÃO.....	5
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	7
2.1 Transmissão das Radiações G, UV, PAR e IV na Atmosfera.....	7
2.2 Brilho Solar.....	12
2.3 Método de Estimativa de Angström-Prescott.....	13
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	16
3.1 Clima.....	16
3.2 Instrumentação.....	19
3.2.1 Heliógrafo.....	22
3.3 Tratamentos dos Dados.....	23
3.3.1 Equações Geoespaciais.....	24
3.4 Indicativos Estatísticos.....	25
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	27
4.1 Transmissividade Atmosférica das Radiações G, UV, PAR e IV Média Mensal.....	27
4.2 Equações de Estimativa Linear e Parabólica das Frações K_T , K_{TUV} , K_{TPAR} e K_{TIV} em função da Razão de Insolação (n/N) Anual e Validação.....	30
4.3 Equações de Estimativa Parabólica das Frações K_T , K_{TUV} , K_{TPAR} e K_{TIV} em função da Razão de Insolação (n/N) Sazonal e Validação.....	39
4.4 Equações de Estimativa Parabólica das Frações K_T , K_{TUV} , K_{TPAR} e K_{TIV} em função da Razão de Insolação (n/N) Mensal e Validação.....	47
5 CONCLUSÃO.....	59
6 REFERÊNCIAS.....	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Sensores G, UV e IV e suas características.....	21
Tabela 2. Evolução anual das frações \bar{K}_T , \bar{K}_{TUV} , \bar{K}_{TPAR} e \bar{K}_{TIV} média mensal.....	28
Tabela 3. Equações de estimativa linear das radiações G, UV, PAR e IV anual.....	31
Tabela 4. Equações de estimativa parabólica das radiações G, UV, PAR e IV anual....	31
Tabela 5. Valores de a, b e R^2 obtidos em outras localidades no Brasil.....	32
Tabela 6. Localidades, coordenadas e clima no Brasil.....	33
Tabela 7. Valores a, b, c e R^2 obtidos em algumas localidades no exterior.....	34
Tabela 8. Localidades, coordenadas e climas no exterior.....	34
Tabela 9. Validação das equações lineares geradas para 2001 a 2004 e validadas no ano de 2005.....	36
Tabela 10. Validação das equações parabólicas geradas para 2001 a 2004 e validadas no ano de 2005.....	38
Tabela 11. Equações de estimativa parabólicas de 2º grau da radiação G, UV, PAR e IV sazonal.....	43
Tabela 12. Validação das equações parabólicas sazonais da radiação G, UV, PAR e IV aplicadas no período sazonal de 2005.....	44
Tabela 13. Equações de estimativa parabólicas de 2º grau da radiação G mensal.....	51
Tabela 14. Equações de estimativa parabólicas de 2º grau da radiação UV mensal.....	51
Tabela 15. Equações de estimativa parabólicas de 2º grau da radiação PAR mensal.....	52
Tabela 16. Equações de estimativa parabólicas de 2º grau da radiação IV mensal.....	52
Tabela 17. Validação das equações parabólicas mensais da radiação G aplicadas nos meses de 2005.....	54
Tabela 18. Validação das equações parabólicas mensais da radiação UV aplicadas nos meses de 2005.....	54
Tabela 19. Validação das equações parabólicas mensais da radiação PAR aplicadas nos meses de 2005.....	55
Tabela 20. Validação das equações parabólicas mensais da radiação IV aplicadas nos meses de 2005.....	55

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Espectro Solar.....	9
Figura 2. Séries da temperatura, umidade, nebulosidade, precipitação e aerossóis em Botucatu.....	17
Figura 3. Sensores: (a) piranometro Eppley PSP; (b) radiometro CUV-3 Kipp & Zonen; (c) piranometro Eppley PSP com cúpula seletiva.....	20
Figura 4. Datalogger Campbell modelo CR 23X.....	21
Figura 5. (a) Heliógrafo Campbell-Stokes; (b) tiras heliográficas.....	23
Figura 6. Frações \bar{K}_T , \bar{K}_{TUV} , \bar{K}_{TPAR} e \bar{K}_{TIV} e razão de insolação (\bar{n}/\bar{N}).....	28
Figura 7. Correlação das frações K_T , K_{TUV} , K_{TPAR} e K_{TIV} em função da razão de insolação (n/N) para agrupamento de dados anuais.....	31
Figura 8. Evolução diurna das médias diárias da radiação UV medido com o modelo estimado.....	35
Figura 9. Índices estatísticos MBE, RMSE e “d” do modelo linear gerados na validação anual de 2005.....	36
Figura 10. Média de cada ano das frações K_T , K_{TUV} , K_{TPAR} e K_{TIV} e média das médias dos anos com desvio padrão.....	37
Figura 11. Índices estatísticos MBE, RMSE e “d” do modelo parabólico, gerados na validação anual de 2005.....	39
Figura 12. Correlação da fração K_T em função da razão de insolação (n/N) para agrupamento de dados sazonais.....	40
Figura 13. Correlação da fração K_{TUV} em função da razão de insolação (n/N) para agrupamento de dados sazonais.....	41
Figura 14. Correlação da fração K_{TPAR} em função da razão de insolação (n/N) para agrupamento de dados sazonais.....	41
Figura 15. Correlação da fração K_{TIV} em função da razão de insolação (n/N) para agrupamento de dados sazonais.....	42
Figura 16. Índices estatísticos MBE, RMSE e “d” da radiação G, gerados na validação sazonal de 2005.....	46

Figura 17. Índices estatísticos MBE, RMSE e “d” da radiação UV, gerados na validação sazonal de 2005.....	46
Figura 18. Índices estatísticos MBE, RMSE e “d” da radiação PAR, gerados na validação sazonal de 2005.....	46
Figura 19. Índices estatísticos MBE, RMSE, e “d” da radiação IV, gerados na validação sazonal de 2005.....	46
Figura 20. Correlação das frações K_T em função da razão de insolação (n/N) para agrupamento de dados mensais.....	47
Figura 21. Correlação das frações K_{TUV} em função da razão de insolação (n/N) para agrupamento de dados mensais.....	48
Figura 22. Correlação das frações K_{TPAR} em função da razão de insolação (n/N) para agrupamento de dados mensais.....	49
Figura 23. Correlação das frações K_{TIV} em função da razão de insolação (n/N) para agrupamento de dados mensais.....	50
Figura 24. Índices estatísticos MBE, RMSE e “d” de ajustamento G, UV, PAR e IV, gerados na validação dos meses de 2005.....	58

LISTA DE SÍMBOLOS

G	Radiação solar global
UV	Radiação solar ultravioleta
PAR	Radiação solar fotossinteticamente ativa
IV	Radiação solar infravermelha
μm	Micrômetro
I_{sc}	Constante solar (1367 W/m ²)
n	Brilho solar (horas)
N	Fotoperíodo (horas)
H_G	Radiação solar global
H_0	Total da radiação incidente em uma superfície plana
H_{UV}	Radiação solar ultravioleta
H_{PAR}	Radiação solar fotossinteticamente ativa
H_{IV}	Radiação solar infravermelha
(n/N)	Razão de insolação
mm	Precipitação em milímetros
PM	Material particulado
AOD	Profundidade ótica de aerossóis
\bar{K}_T	Fração média da radiação solar global pela radiação extraterrestre
\bar{K}_{TUV}	Fração média da radiação solar ultravioleta pela radiação solar ultravioleta no topo da atmosfera
\bar{K}_{TPAR}	Fração média da radiação solar fotossinteticamente ativa pela radiação solar fotossinteticamente ativa no topo da atmosfera
\bar{K}_{TIV}	Fração média da radiação solar infravermelha pela radiação solar infravermelha no topo da atmosfera
K_T	Fração da radiação solar global pela radiação solar extraterrestre
K_{TUV}	Fração da radiação solar ultravioleta pela radiação solar ultravioleta no topo da atmosfera
K_{TPAR}	Fração da radiação solar fotossinteticamente ativa pela radiação solar

	fotossinteticamente ativa no topo da atmosfera
K_{TIV}	Fração da radiação solar infravermelha pela radiação solar infravermelha no topo da atmosfera
E_0	Fator de correção da excentricidade da órbita da terra
Γ	Ângulo diário, em radianos
DJ	Dia Juliano
δ	Declinação solar (graus)
ϕ	Latitude local (graus)
h	Ângulo horário

RESUMO

O trabalho descreve a análise da transmissividade atmosférica da média mensal das radiações Global (\bar{K}_T), Ultravioleta (\bar{K}_{TUV}), Fotossinteticamente Ativa (\bar{K}_{TPAR}) e Infravermelha (\bar{K}_{TIV}) em função da razão de insolação (\bar{n}/\bar{N}). As equações de estimativas das frações K_T , K_{TUV} , K_{TPAR} e K_{TIV} em função de (n/N) foram apresentadas e discutidas para os agrupamentos dos dados anual, sazonal e mensal. A base de dados das radiações Global (G), Ultravioleta (UV), Fotossinteticamente Ativa (PAR), Infravermelha (IV) e o número de horas de brilho solar (n) foram medidas no período de 2001 a 2005 em Botucatu/SP/Brasil. Os resultados da análise mostram que existe uma correlação entre a transmissividade atmosférica K_T , K_{TUV} , K_{TPAR} e K_{TIV} , com a razão de insolação (n/N), em Botucatu. Os valores de K_T , K_{TUV} , K_{TPAR} e K_{TIV} e insolação (n/N) foram menores na estação chuvosa (alta concentração de nuvens e vapor d'água) e maior na estação seca (baixa concentração de nuvens e vapor d' água e alta concentração de aerossóis). Os valores de K_T variaram de 47,1% em janeiro a 60,4% em abril, com média de 55,0%; para K_{TUV} 3,66% em janeiro a 4,13% em setembro, com média de 40,0%; K_{TPAR} de 60,7% em janeiro a 76,3% em abril, com média de 69,0%; K_{TIV} de 38,8% para 75,1% com média de 46,2%. O valor da razão de insolação variou de 38,8% em janeiro para 75,0% em agosto, com uma média de 58,0%. Os resultados obtidos com os modelos de estimativas de Angström mostram que as correlações de K_T , K_{TUV} , K_{TPAR} e K_{TIV} em função da razão de insolação (n/N) para agrupamentos total dos dados diários (anual) se ajustaram a dois tipos de equações de regressão: linear e parabólico com coeficientes de correlações R^2 variando entre 0,750 a 0,880. Na validação do modelo linear, os indicativos estatísticos: MBE

inferior a $\pm 6,0\%$; RMSE inferior a $13,6\%$ e “d” de Willmott superior a $0,946$ mostram um bom nível de ajustamento em relação a medida. Na validação do modelo parabólico, os indicativos estatísticos foram: MBE inferior a $\pm 6,1\%$; RMSE inferior a $12,9\%$ e “d” de Willmott superior a $0,948$. Similarmente, existe uma correlação sazonal (estações do ano) entre K_T , K_{TUV} , K_{TPAR} e K_{TIV} , e a razão de insolação (n/N): para o K_T , os resultados foram melhores na seqüência nas estações: outono, primavera, verão e inverno. O maior valor da correlação parabólica para (outono) foi $R^2 = 0,887$ e o menor (inverno) $R^2 = 0,867$. Para o K_{TUV} , foram: verão, outono, primavera e inverno, onde o maior valor (verão) foi $R^2 = 0,863$ e o menor (inverno) $R^2 = 0,812$. Para o K_{TPAR} , foram: outono, verão, primavera e inverno, onde o maior valor (outono) foi $R^2 = 0,879$ e o menor (inverno) $R^2 = 0,864$. Para o K_{TIV} , foram: outono, primavera, verão e inverno, onde o maior valor (outono) foi $R^2 = 0,887$ e o menor (inverno) $R^2 = 0,861$. Os resultados obtidos para MBE, RMSE e “d” na validação das equações sazonal são similares aos obtidos com o modelo anual. Na partição mensal, existe uma correlação dos meses entre K_T , K_{TUV} , K_{TPAR} e K_{TIV} , e a razão de insolação (n/N): para K_T , os resultados foram melhores na seqüência: maio, agosto, setembro, outubro, novembro, fevereiro, janeiro, dezembro, julho, março, junho e abril. O maior valor da correlação parabólica (maio) foi $R^2 = 0,956$ e o menor (abril) com $R^2 = 0,798$. Para o K_{TUV} , foram: maio, outubro, novembro, fevereiro, janeiro, março, junho, dezembro, agosto, julho, setembro e abril. O maior valor (maio) com $R^2 = 0,945$ e o menor (abril) com $R^2 = 0,770$. Para o K_{TPAR} , foram: maio, agosto, setembro, outubro, novembro, fevereiro, janeiro, dezembro, julho, março, junho e abril. O maior valor (maio) com $R^2 = 0,954$ e menor (abril) com $R^2 = 0,797$. Para o K_{TIV} , foram: agosto, outubro, setembro, novembro, fevereiro, janeiro, dezembro, junho, julho, março e abril. O maior valor (maio) com $R^2 = 0,952$ e menor (abril) com $R^2 = 0,790$. Os resultados obtidos pelos indicativos estatísticos MBE, RMSE e “d” mostram um bom nível de ajustamento em relação à medida. O modelo de estimativa parabólico obteve melhor precisão em relação ao modelo linear.

Palavras-chave: Razão de insolação, modelos de estimativa, transmissividade atmosférica, radiação G, UV, PAR e IV.

ULTRAVIOLET, PHOTOSYNTETICALLY ACTIVE AND INFRARED SOLAR RADIATIONS ESTIMATED MODELS DUE TO RELATIVE SUNSHINE DURATION. Botucatu, 2011. 69p. Dissertation (Masterin Agronomy/ Energy in Agriculture) – Faculty of Agronomic Sciences, State University of São Paulo.

Author: FÁBIO HENRIQUE PIRES CORRÊA

Adviser: JOÃO FRANCISCO ESCOBEDO

SUMMARY

The paper deals with the atmospheric transmission (solar fractions K_i) in monthly scale by sunshine ratio, global (\bar{K}_T), ultraviolet (\bar{K}_{TUV}), photosynthetically active (\bar{K}_{TPAR}) and infrared (\bar{K}_{TIR}) solar fractions. Estimated equations K_T , K_{TUV} , K_{TPAR} and K_{TIR} as a function of n/N were presented and discussed for the annual, seasonal and monthly solar radiation database. The sunshine values and the global (G), ultraviolet (UV), photosynthetically active (PAR) and infrared (IR) radiations database was measured in the period of 2001 to 2005 in Botucatu – SP – Brazil. The results of climate analysis show a correlation between the solar fractions K_T , K_{TUV} , K_{TPAR} and K_{TIR} with the relative sunshine duration (n/N) in Botucatu. The values of K_T , K_{TUV} , K_{TPAR} and K_{TIR} and relative sunshine duration (n/N) were lower in the rainy season (high concentration of clouds and water vapor) and higher in the dry season (low concentration of clouds and water vapor and high concentration of aerosols). The K_T values ranged from 47,1% in January to 60,4% in April, with a mean of 55,0%; K_{UV} from 3,66% in January to 4,13% in September, with a mean of 40,0%; K_{PAR} from 60,7% in January to 76,3% in April, with a mean of 69,0%; K_{IR} from 38,8% to 75,1%, with a mean of 46,2%. The relative sunshine duration values ranged from 38,8% in January to 75,0% in August, with a mean of 58,0%. The results of the annual estimated models show that the K_T , K_{TUV} , K_{TPAR} and K_{TIR} correlations due to relative sunshine duration fitted to the linear and parabolic correlation equations, with R^2 ranging from 0,750 to 0,880. The linear model validation shows MBE less than $\pm 6,0\%$, RMSE less than 13,6% and “d” (Willmott) above 0,946. The parabolic model validation shows MBE less than $\pm 6,1\%$, RMSE less than 12,9% and “d” (Willmott) above

0,948. Seasonal correlations between solar fraction K_T , K_{TUV} , K_{TPAR} and K_{TIR} with relative sunshine duration (n/N) were also identified. For K_T , the best results follow the sequence: fall, spring, summer and winter. The highest parabolic correlation value (fall) for R^2 was 0,887 and the lowest one (winter) was 0,867. For K_{TUV} , the best results follow the sequence: summer, fall, spring and winter. The highest value (summer) for R^2 was 0,863 and the lowest one (winter) was 0,812. For K_{TPAR} , the best results follow the sequence: fall, summer, spring and winter. The highest value (fall) for R^2 was 0,879 and the lowest one (winter) was 0,864. For K_{TIR} , the best results follow the sequence: fall, spring, summer and winter. The highest value (fall) for R^2 was 0,887 and the lowest one (winter) was 0,861. The MBE, RMSE, “d” (Willmott) results show that the K_T , K_{UV} , K_{PAR} and K_{IR} seasonal estimated models were similar to annual estimated models results. Monthly correlations between solar fraction K_T , K_{TUV} , K_{TPAR} and K_{TIR} with relative sunshine duration (n/N) were also identified. For K_T , the best results follow the sequence: May, August, September, October, November, February, January, December, July, March, June and April. The highest value (May) for R^2 was 0,956 and the lowest one (April) was 0,798. For K_{TUV} , the best results follow the sequence: May, October, November, February, January, March, June, December, August, July, September and April. The highest value (May) for R^2 was 0,945 and the lowest one (April) was 0,770. For K_{TPAR} , the best results follow the sequence: May, August, September, October, November, February, January, December, July, March, June and April. The highest value (May) for R^2 was 0,954 and the lowest one (April) was 0,797. For K_{TIR} , the best results follow the sequence: May, August, October, September, November, February, January, December, June, July, March and April. The highest value (May) for R^2 was 0,952 and the lowest one (April) was 0,790. The MBE, RMSE, “d” results show that the K_T , K_{TUV} , K_{TPAR} and K_{TIR} monthly estimated models had satisfactory adjustment in relation to the measured data. The parabolic model obtained better accuracy than linear model.

Keywords: Relative sunshine duration, estimated models, atmospheric transmissivity, G, UV, PAR e IR radiations.

1 INTRODUÇÃO

O conhecimento da distribuição das radiações solares: ultravioleta (UV), fotossinteticamente ativa (PAR) e infravermelha (IV), no tempo e espaço, é importante em muitas áreas científica e tecnológica.

A radiação UV, faixa espectral de 0,280 a 0,385 μm , exerce uma influência significativa sobre a superfície atmosférica e terrestre: na estratosfera, a absorção da radiação UV exercida pelos constituintes atmosféricos, provoca o aumento da temperatura do ar nas camadas superiores. Em condições atmosféricas de céu aberto, cerca de 11,0% da radiação UV é atenuada pelo ozônio, 14,0% por aerossóis e 25,0% pelo ar seco. Na superfície terrestre, o efeito da radiação UV é importante em múltiplas áreas de pesquisa como desenvolvimento e modificações de ecossistemas; decomposição de águas residuais e de contaminantes urbanos e industriais, mediante o uso de concentradores solares, fotodegradação de plásticos, corantes, tintas, fibras naturais e sintéticas, fotobronzeamento, incidência de câncer de pele, cataratas e influência nas mudanças climáticas em escala Mundial.

A radiação PAR, faixa espectral entre 0,385 a 0,700 μm , é fundamental nos processos fisiológicos porque ativa os pigmentos fotossintéticos, permitindo que as plantas absorvam a energia radiante do sol e a convertam em energia química, através do processo de fotossíntese. Ela é extensivamente estudada em áreas como fisiologia vegetal, biológica,

agronômica e florestal. A radiação PAR contribui ainda no sistema de produção e investimento tecnológico, para aumentar a eficiência agrícola e produtividade.

A radiação IV na faixa espectral entre 0,7 a 3,0 μ m, denominado de infravermelho próximo, é usada na técnica observacional por satélites e em algumas aplicações nas áreas biológicas e agrônomicas. O efeito biológico da radiação IV nas plantas no intervalo 0,7 a 7,3 μ m é importante para o desenvolvimento vegetativo da cultura como germinação das sementes, alongamento, floração e coloração dos frutos.

A melhor forma de se saber o perfil de radiação de uma localidade é por meio de medidas. Entretanto, na ausência de medidas, modelos podem ser criados para estimativa de valores perdidos ou ausentes. Com dados de brilho solar, que são mais comuns, estima-se a radiação global e, devidamente armazenada, serve de parâmetro para elaboração de mapas e/ou cartas solares. Os modelos podem ser estatísticos, estocásticos e de redes neurais. A medida de horas de brilho solar é uma medida indireta da radiação solar global e uma das mais antigas. Na literatura há evidências de registros de dados de brilho solar de mais de 80 anos, enquanto que a base de dados de radiação solar global, medida por piranômetros, é relativamente mais recente.

Através do modelo de estimativa de Angström-Prescott, podem-se encontrar valores da radiação solar como (G, UV, PAR e IV) a partir de uma variável chamada brilho solar (n). Este modelo de Angström-Prescott permite, relacionar a radiação na superfície terrestre com a radiação na superfície atmosférica em função da razão de insolação (n/N) atribuindo uma correlação de primeira ou segunda ordem. Desta maneira a estimativa da radiação solar pode ser encontrada e aplicada em estudos da área científica.

O presente trabalho tem dois objetivos: 1 - a obtenção de uma correlação entre a transmissividade atmosférica \bar{K}_T , \bar{K}_{TUV} , \bar{K}_{TPAR} e \bar{K}_{TIV} e a razão de insolação (\bar{n}/\bar{N}) médias mensais para o período de 2001 a 2004 em Botucatu; 2 - propor equações usando o modelo de Angström de primeira ou segunda ordem relacionando a transmissividade atmosférica K_T , K_{TUV} , K_{TPAR} e K_{TIV} e a razão de insolação (n/N) diárias, para estimar as radiações UV, PAR e IV a partir do brilho solar para agrupamentos de dados anual, sazonal e mensal.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Transmissão das Radiações G, UV, PAR e IV na Atmosfera

A principal fonte de energia disponível aos processos naturais ocorrentes na superfície terrestre, responsável por mudanças climáticas (temperatura, pressão, vento, umidade e chuva) é o Sol. Essa estrela gasosa possui uma temperatura de 6000 K na superfície da fotosfera, 1×10^6 K na coroa e 1×10^7 K em seu interior que promove a fusão nuclear de hidrogênio em hélio. Essa energia emite densidade de fluxo de $62 \times 10^3 \text{ kWm}^{-2}$ na forma de ondas eletromagnéticas e, desta energia, apenas 1367 Wm^{-2} atinge o topo da atmosfera terrestre (I_{sc}) (IQBAL, 1983).

Essa energia oriunda do sol ao atravessar a superfície atmosférica, sofre alterações chegando somente uma parcela à superfície terrestre denominada de radiação solar global (G).

Essas alterações ocorrem quando os raios de luz colidem com gases ou partículas constituintes na atmosfera. A reflexão é causada pelas nuvens, enquanto a difusão ou espalhamento ocorrem da seguinte forma, parte da radiação dirige-se a terra e parte retorna ao espaço como difusão. A absorção é realizada por gases como ozônio, gases permanentes ou poeiras, vapor d'água, gás carbônico e etc.

Na atmosfera terrestre, a radiação solar global (G) quando integrados diariamente podem variar em função da declinação solar, latitude local e do ângulo horário.

Esses fatores são dependentes dos movimentos de rotação e translação da Terra, permitindo assim, um local receber raios solares diferenciados ao longo do dia decorrente de sua declinação.

A radiação solar global (G) na superfície terrestre é composta espectralmente pelas radiações: ultravioleta (UV), fotossinteticamente ativa (PAR) e a infravermelha (IV). Essa composição corresponde no total de 100% do espectro solar iniciando na faixa 0,22 à 4,0 μ m, denominado de ondas curtas.

Na literatura, as radiações UV, PAR e IV mostram uma variação na divisão do seu percentual que compõem todo o espectro solar. Isso ocorre devido há dificuldades em medir e de obter medidas com precisão para essas radiações.

Al-Aruri et al., (1988), mostram que a radiação UV no topo da atmosfera representa aproximadamente 9% (0,29 a 0,385 μ m) do total do espectro solar; a radiação PAR representa 45% (0,358 a 0,7 μ m) e a IV em 46% (0,7 a 4,0 μ m).

Segundo Foyo-Moreno et al., (1999), a radiação UV corresponde na faixa total do espectro solar no topo é 5,7% ou 78 W/m². Para a radiação PAR, (ALADOS-ARBOLEDAS et al., 2000) a faixa (no topo) se encontra em 38,8% ou 530 W/m². Na faixa espectral da radiação IV, esse percentual representa 55,5%. Devido há poucos estudos nessa área de especialização, esse valor pode ser avaliado através do método da diferença: $IV = G - (UV + PAR)$, onde G no espectro total representa 100% ou (1367 W/m²).

A figura 1 apresenta o espectro solar com as três radiações simultaneamente.

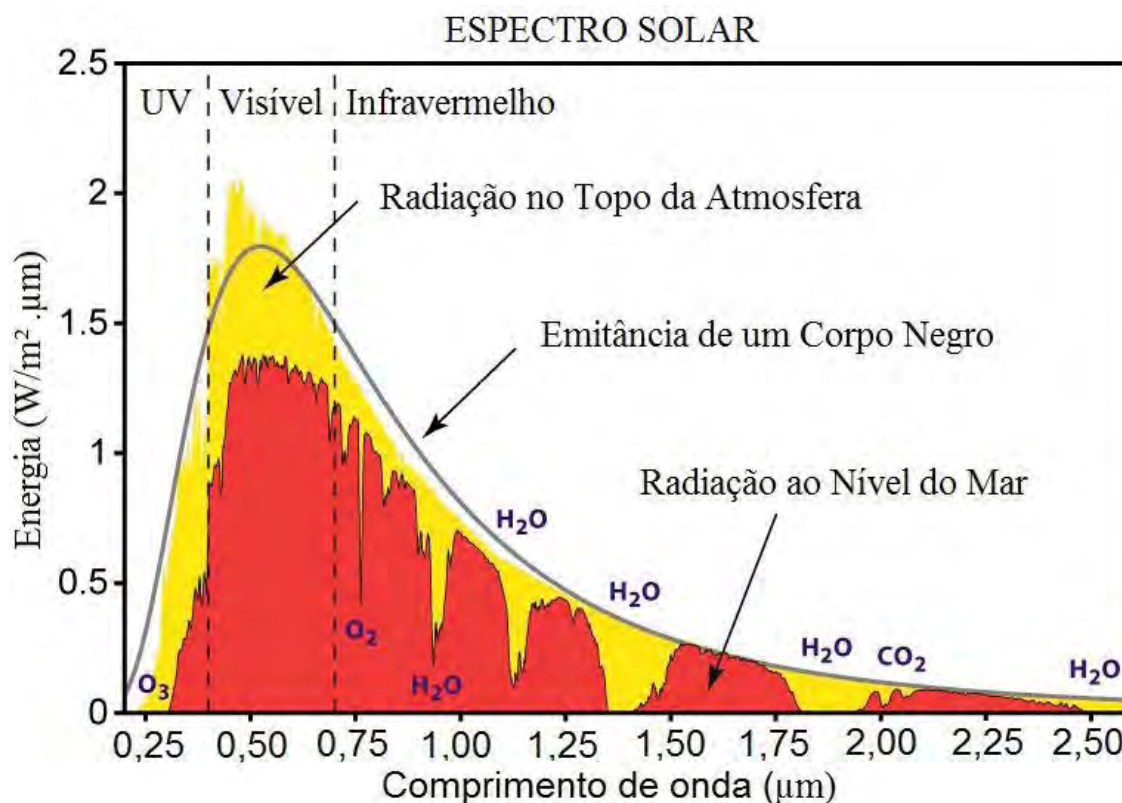


Figura 1. Espectro Solar.

Fonte: ROHDER, 2011, modificado por Corrêa, 2011.

O valor da radiação UV na superfície da terra depende do ângulo zenital solar, ozônio atmosférico e transparência da atmosfera (KYLLING et al., 2000; KIRCHHOFF et al., 2002; LUCCINI et al., 2003). Os comprimentos de ondas da UV são divididos em três categorias; UV-A (0,400-0,315μm), UV-B (0,315-0,290μm) e UV-C (0,290-0,220μm). A superfície da Terra recebe apenas UV-A e UV-B, enquanto o componente UV-C é removido através da absorção da camada de ozônio (O₃). A radiação UV-B é parcialmente absorvido pela camada de ozônio enquanto UV-A é transmitida.

Os raios UV-A e UV-B pode ser benéficos e prejudiciais aos seres humanos, ao ecossistema, aos animais, as plantas e a vários tipos de materiais.

De acordo com Gies (1998) e Roy et al. (1998), altas doses de radiação ultravioleta, especialmente UV-B, provoca doenças de pele, catarata, foto-decomposição das águas residuais e de contaminantes industriais mediante ao uso de concentradores solares

(JIMÉNEZ et al., 2000; BLATCHLEY III et al., 2008), degradação de materiais (ANDRADY et al., 1998), podendo prejudicar as culturas.

Portanto, a radiação UV tem sua atenuação diminuída a partir da destruição da camada de ozônio através de poluentes como aerossóis liberados pelo spray, testes de bomba atômica etc.

A segunda faixa existente dentro do espectro solar é a radiação fotossintética ativa (PAR), onde se encontra na faixa do visível (0,358 a 0,7 μ m). A radiação PAR tem grande influência no desenvolvimento e crescimento das plantas pelo processo da fotossíntese (MCCREE, 1972; UDO, 1999).

Neste sentido a radiação (PAR) torna-se importante, pelo motivo que as plantas assimilam esta faixa de radiação do espectro solar fazendo com que a mesma realize o processo natural da fotossíntese, tendo grande importância para as pesquisas agrônômicas e de fisiologia vegetal (ALVALÁ; SILVA, 2000), como produtividade de culturas (GALVANI; ESCOBEDO, 2000), caracterização das plantas entre outros.

Segundo Gomes (2002), a obtenção da radiação PAR pode ser através do método indireto e direto. O método indireto é obtido através da diferença entre duas medidas de irradiância correspondentes geralmente às faixas de comprimento de onda de 0,285 a 2,700 μ m e 0,695 a 2,700 μ m, no caso da PAR definida como sendo parte do espectro aproximadamente entre 0,400 e 0,700 μ m. O método direto é obtido através de sensor quântico que mede somente a faixa correspondente da radiação PAR no espectro solar.

A terceira faixa consiste na radiação infravermelho de ondas curtas (IV) de 0,7 a 3,0 μ m. Essa radiação não tem grande absorção pelas plantas porque sua importância visa na absorção de vapor d'água e no aumento da temperatura do ar (HEMMING et al., 2006). Entretanto a radiação IV de ondas longas é causador do efeito estufa (LUDLAM, 1980; VOGELMANN et al., 1998), fator importante por essa faixa de radiação apresentar uma absorção e interação com a atmosfera. Embora, essa radiação apresente grande importância climática, é pouco estudado pela dificuldade de medição.

Em muitos países as radiações UV, PAR e IV vêm sendo estudadas, porém a radiação UV é mais estudada que a radiação PAR e IV. Neste sentido, a fração UV da radiação solar global G, tem sido investigada por meio de observações experimentais em muitos países, como mostra os trabalhos de Al-Aruri et al. (1990) no Kuwait, Robaa (2004) no

Cairo – Egypt, Cañada et al. (2003) em Valência e Córdoba na Espanha, Martinez-Lozano et al. (1994 e 1999) em Valência na Espanha, Jacovides et al. (2006) para Athalassa em Cyprus, Ogunjobi and Kim (2004) e Escobedo et al. (2009 e 2011) em Botucatu no Brasil. Os resultados mostram que a correlação entre as radiações UV e G é altamente dependente das condições do clima por meio das variações da concentração de nuvens, vapor d'água e aerossóis na atmosfera do local: a radiação UV total constitui uma fração média aproximada entre 2,0 % a 9,5% da radiação solar global G, onde os maiores valores da fração UV/G é devido a presença de ar seco com aerossóis na atmosfera sem nuvens, enquanto os menores valores ocorrem na atmosfera nebulosa e úmida (ESCOBEDO, 2009).

O efeito da cobertura de céu na relação entre as radiações PAR e G, também já foi estudado em muitos locais e com diferentes climas, como mostram os trabalhos de Jacovides et al. (2004 e 2007) para Athalassa em Cyprus e Athenas na Grécia, respectivamente, Finch et al. (2004) para Lusaka na Zambia, Blackburn e Proctor (1983) em Guelph Ontário Canadá, Rao (1984) para Corvalis em Oregon no Estados Unidos, de Papaioannou et al. (1996) para Athenas na Grécia, de Stigter e Musabilha (1982) em Llorim na Nigéria, e Escobedo et al. (2009 e 2011) em Botucatu no Brasil. Os resultados mostram que a correlação entre as radiações PAR e G, também depende das condições do clima local e mostram que a fração PAR representa um percentual entre 40,8% a 63,1% da radiação solar global G. Similarmente a variação UV/G na atmosfera, os maiores valores da fração PAR/G são obtidos em atmosfera clara, seca com presença de aerossóis, enquanto os menores valores, em atmosfera nebulosa e úmida.

Com as radiações G e IV, existem poucas informações sobre observações experimentais simultâneas das duas radiações na superfície terrestre. Resultados recentes mostram que a radiação IV depende das condições de cobertura de céu, principalmente da presença de vapor d' água na atmosfera, e constitui uma fração média da radiação global G entre 44% na cobertura de céu nublado a 51,5% na cobertura de céu aberto (Escobedo et al., 2009). Para valores médios sobre todas as coberturas de céu, a fração IV constitui o percentual entre 46,9% a 51,0% da radiação global, como mostram os trabalhos de Escobedo et al. (2011) para Botucatu no Brasil; Zhang (2000) em Lhasa na China e Bolsenga (1967) em Thule na Groenlândia.

2.2 Brilho Solar

A quantidade de radiação solar global é uma das variáveis mais importantes para determinação da produção de energia em uma região. Dependendo da latitude, altitude e outros fatores meteorológicos, a intensidade da irradiação solar é medida apenas em um número limitado de locais ao redor do mundo. A medida da irradiação solar requer o uso de piranômetros. No entanto, a operação e a manutenção desses equipamentos estão fora das limitações de trabalho de muitas estações meteorológicas locais. Neste caso, para valores não medidos ou perdidos da radiação solar, aplicam-se modelos de estimativa para suprir esses valores com base em dados de horas de brilho solar (n) que são comuns em muitas estações de meteorologia. Muitas estações meteorológicas no mundo medem de rotina o brilho solar e esta é a variável mais utilizada para modelagem de radiação solar (CEBALHOS et. al., 1992).

Portanto, através de um equipamento mecânico conhecido como Heliógrafo Campbell-Stokes, é possível, determinar diariamente quanto teve de luz solar durante o dia. Consiste em uma esfera de vidro, que quando a luz solar incide sobre a esfera, é gerado um raio de luz queimando uma fita de papel denominado de tiras heliográficas com marcações das horas do dia.

Essa forma de medida gerou o início de criações de estações de meteorologias em todo mundo, agregando um aumento em informações como dados para determinar modelos de estimativas a partir do brilho solar (TIBA; FRAIDENRAICH, 2004).

Com esse aparelho, equações de estimativa começaram a ser elaboradas, com os fundamentos de estimar a radiação global, direta, etc e com bases desses dados foi possível criar um atlas de número de horas de brilho solar do mundo todo.

Atualmente, esse aparelho é muito utilizado pela sua facilidade de interpretação dos dados e de ser um aparelho mecânico, sendo necessário um técnico especializado para o manuseio das trocas das fitas heliográficas diariamente. Porém, existem problemas que são vistos, mais não são corrigidos, em função da falta de padronização exercida pela Organização Meteorológica Mundial (WMO, 2006), ou seja, cada país ou estação meteorológica adota um sistema de uso das tiras heliográficas totalmente diferenciadas da norma (WMO, 2006). Essas características técnicas da falta de padronização ocorrem

medidas não exatas ou imprecisas devido à baixa qualidade e diversidade, densidade e coloração do papel utilizada na medida do brilho solar daquela localidade.

O comprometimento do técnico torna-se exaltivo com o passar dos dias, decorrente da falta de tempo em trocar as tiras heliográficas antes do nascer do sol, ou quando há períodos de chuvas intensas com abertura do céu durante o dia. Além do fator humano, outro problema visual são as cores impressas nas tiras heliográficas, podendo acarretar em uma absorção maior ou menor de radiação solar dependendo da cor impressa e a relação com a umidade do ar, sendo que ao chover, a tira heliográfica se torna molhada ou dificultando a queima do papel.

2.3 Método de Estimativa de Angström-Prescott

O modelo apresentado por Angström-Prescott (1924) é uma relação entre a radiação global (H_G) e a radiação extraterrestre (H_0), formando uma fração (H_G/H_0), atualmente representado por (K_T) onde foi correlacionado linearmente com o número de horas de brilho solar (n) e pelo fotoperíodo (N) formando a razão de insolação (n/N). O coeficiente linear (a) e angular (b) podem ser obtidos através de ajustes estatísticos, onde o coeficiente (a) representa a transmissividade mínima e ($a + b$) a máxima, ou seja, um dia completamente nebuloso e outro de céu claro.

No Brasil, outros pesquisadores já utilizaram o método de Angström-Prescott para determinar os valores de a e b e estimando a radiação solar global para aquele local como (RIBEIRO, 1980) que encontrou valores de a e b para 32 estações em regiões do Brasil, (CERVellini et al., 1966; OMETTO, 1968; ALVES et al., 1981; AZEVEDO et al., 1981; FONTANA; OLIVEIRA, 1996; AGUIAR et al., 1999; TIBA et al., 2005) mostram outros trabalhos utilizando o método de estimativa de Angström-Prescott.

Em outros países vários pesquisadores usaram o mesmo modelo de Angström-Prescott para estimar a radiação solar global e os coeficientes a e b como, (MARTINEZ-LOZANO, 1984) onde apresentou a evolução da equação de Angström e os valores de a e b para diferentes localidades em todo mundo; (LIN; LU, 1998) estimaram a radiação global com o brilho solar para a província de Yunnan na China; (SUPIT; VAN KAPPEL, 1998) estimaram com o mesmo método a radiação global para República Checa,

Finlândia, França, Alemanha, Irlanda, Itália, Espanha, Suécia e Europa, (POWER, 2001) estimou a radiação global para Montreal, Toronto, Uccle e Vancouver e (LIU et al., 2009) calibrou os coeficientes de Angström-Prescott a e b em diferentes escalas de tempo na Bacia do Rio Amarelo na China.

A equação (1) representa o modelo de estimativa Angström-Prescott:

$$(H_G/H_0) = a + b (n/N) \quad (1)$$

onde H_G é a irradiação global, H_0 é o total de radiação incidente em uma superfície horizontal, n é o brilho solar e N o fotoperíodo.

Sendo assim H_G é estimada pela equação, e dependente do local e da época do ano. Os coeficientes a e b são coeficientes obtidos através de regressão linear adequada a cada série de dados. Nesta equação os significados físicos para os coeficientes a e b podem ser entendidos da seguinte maneira: quando (n/N) tende a zero, a razão (H_G/H_0) tende a (a). A equação mostra que (a) não pode ser maior que 1 sendo que (a) representa a transmissividade mínima da radiação local. Em um dia completamente claro onde a razão (n/N) tende a 1 a soma de $(a + b)$ representa a fração da radiação solar extraterrestre incidente da terra em condições de dias de céu aberto, ou seja, representa o coeficiente de transmissão atmosférica máxima.

Na literatura, autores como (AKINOGLU; ECEVIT, 1990; AMPRATWUM; DORVLO, 1999; ALMOROX; HONTORIA, 2004; BAKIRCI, 2009), estimaram a radiação global pelo método tradicional de Angström-Prescott comparando com o método quadrático ou parabólico de 2º grau, onde o modelo parabólico representou o mais adequado para o uso de criação de modelos de estimativa da radiação G em função do (n/N) . A equação (2) apresenta o modelo quadrático ou parabólico de segundo grau.

$$(H_G/H_0) = a + b (n/N) + c (n/N)^2 \quad (2)$$

Os modelos de estimativa de Angström-Prescott e Akinoglu e Ecevit, são simplesmente derivados de modelos estatísticos de regressão linear e parabólica de 2º grau.

Segundo Spiegel e Stephens (2009), o método de ajuste parabólico de 2º grau, segue o mesmo princípio da regressão linear, porém se ajustando melhor aos pontos distribuídos entre a correlação, determinando a curvatura da parábola, sendo positiva ou negativa. A equação (3) mostra a regressão parabólica de 2º grau:

$$y = a + bx + cx^2 \quad (3)$$

onde a é o intercepto da reta no eixo y , b o coeficiente angular e c determina a curvatura em relação aos pontos.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Clima

As medidas foram realizadas no período de 2001 a 2005 na Estação de Radiometria Solar de Botucatu, FCA, UNESP, com coordenadas geográficas: latitude de 22°54' S, longitude de 48°27' W e altitude de 786 m. O clima local é temperado quente (mesotérmico) com chuvas no verão e seca no inverno. O dia mais longo do ano (solstício de verão) tem 13,4 horas em dezembro, e o mais curto (solstício de inverno) tem 10,6 horas em junho. Os elementos climáticos característicos que afetam diretamente os valores das radiações solares em Botucatu podem ser observados por meio dos valores médios mensais nas séries climáticas de 30 anos de temperatura, umidade, precipitação, insolação e série climática de 5 anos de aerossóis (Figura 2).

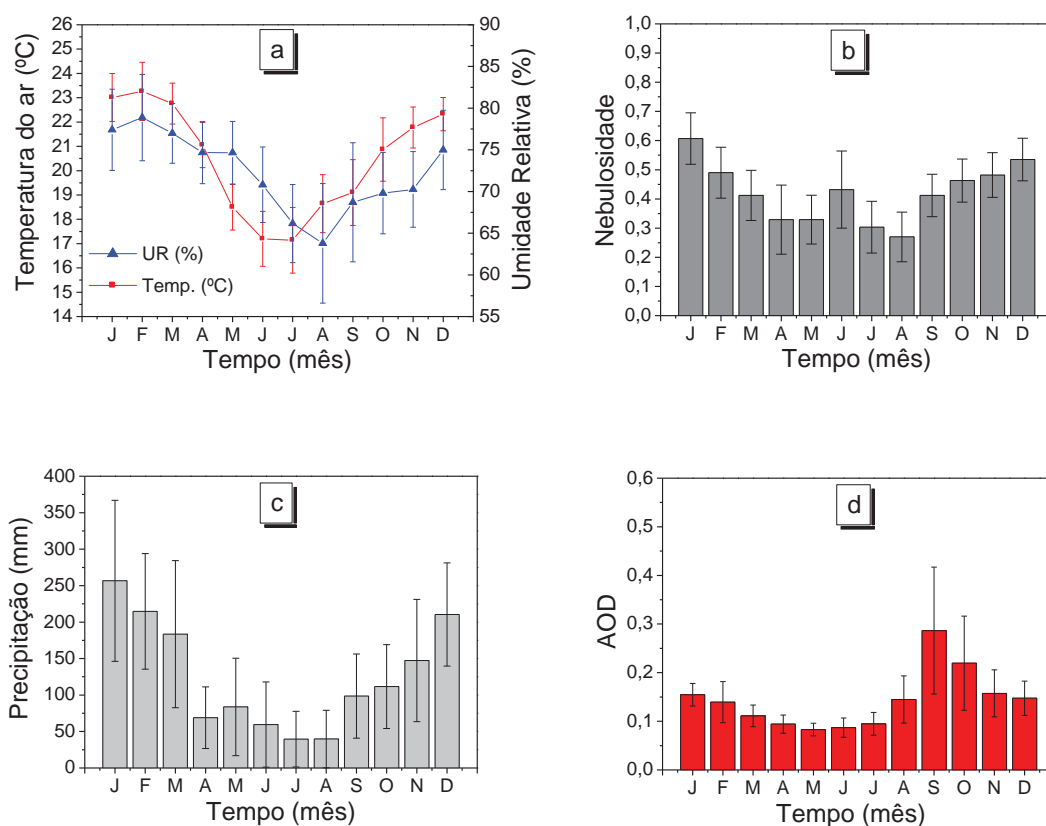


Figura 2. Séries da temperatura, umidade, nebulosidade, precipitação e aerossóis em Botucatu.

A evolução anual da temperatura e umidade relativa média mensal segue as variações astronômicas do sol, os valores da temperatura e umidade relativa são maiores quando o sol declina mais próximo da latitude local (radiação solar mais elevada), e menor quando o sol declina no hemisfério norte (radiação solar menos elevada). Os meses de fevereiro e julho são os meses mais quentes e frios do ano, respectivamente, com temperaturas médias de 23,2 C° e 17,1 C°, enquanto que, fevereiro e agosto são os meses mais e o menos úmidos, com percentuais de 78,2% e 61,80% respectivamente.

A nebulosidade afeta diretamente a radiação solar e é definida pela equação $f = 1 - n/N$ e expressa o número de horas que o sol ficou encoberto numa razão de insolação n/N , onde n é o número de horas de brilho solar e N é o fotoperíodo (IQBAL,1978). A evolução temporal da nebulosidade é proporcional às evoluções da temperatura e umidade relativa, na grande maioria dos meses. A exceção ocorre por conta dos meses de maio e junho,

nos quais a nebulosidade aumenta, a baixos níveis de temperatura e umidade. Essa singularidade ocorre por conta das entradas das frentes frias vindas do sul do país que arrastam grandes quantidades de massas de ar frio, a partir da metade do outono, nos meses de abril e maio. A nebulosidade é mais elevada nos meses de janeiro ($f = 0,61$) e menos elevada em agosto ($f = 0,27$). Contrastando a nebulosidade, os meses de maior e menor número de horas de brilho solar ocorrem em agosto e fevereiro com totais de 229h e 175,28h respectivamente (figura 2b).

A maior precipitação ocorre no mês de janeiro com total de 260,7mm e a mínima em agosto com 38,2mm (figura 2c). O ciclo da precipitação é constituído de períodos bem distintos, de acordo com o regime de chuvas: o período chuvoso (outubro à março) e o período seco (abril à setembro), onde os índices pluviométricos encontram-se abaixo do nível de 100mm. No período chuvoso, de outubro a março, concentrado nas estações da primavera e verão, quando ocorrem mais de 80% do total anual de chuvas, a precipitação é de natureza convectiva, originada do processo de convecção livre. É do tipo localizada, com grande variabilidade espacial; a intensidade é moderada a forte dependendo do desenvolvimento vertical da nuvem; a predominância é no período da tarde ou início da noite, e a duração, é curta à média, de minutos à horas. No período seco de abril à setembro, nas estações de outono e inverno, a precipitação é do tipo frontal, originada do encontro das massas frias e secas vindas da região sul com as massas quentes e úmidas da região sudeste do Brasil, típicas das latitudes médias. A distribuição da chuva frontal é generalizada na região, a intensidade é fraca a moderada, dependendo do tipo de frente fria, e a duração é de média a longa (horas ou dias), dependendo da velocidade de deslocamento da frente.

Botucatu conta com 127,370 habitantes e é uma cidade do tipo universitária, inserida em uma região rural com plantações de cana-de-açúcar e eucaliptos. Atualmente, a cidade conta com cerca de 4% de sua área territorial (1483 km²) ocupado por cana-de-açúcar, e rendimento aproximado de 420.000 toneladas de cana por ano, uma modesta quantia se comparado com as cidades vizinhas. A cidade não possui grandes indústrias e nem possui um excesso de automóveis. A frota de veículos automotores em 2005 é de 51.390. Porém nos meses do período da seca, a partir de junho até novembro, a atmosfera local apresenta elevada concentração de materiais particulados provenientes das queimadas da cana-de-açúcar e das usinas que produzem açúcar e álcool. As cidades adjacentes (70 cidades dentro

de um raio de 150 km) incluindo aquelas cidades que tem medidas de material particulado (Limeira e Santa Gertrudes) totalizam aproximadamente 36 milhões de toneladas de cana-de-açúcar de rendimento por ano, extensão excedente cerca de 10% do total de área (CODATO et al., 2008). Portanto, ao redor de Botucatu, esta é uma significativa contribuição da poluição do ar pela queimada da biomassa.

Os poluentes atmosféricos conhecidos como “material particulado (também conhecido pela sigla em inglês PM)” não constituem uma espécie química definida, e sim um conjunto de partículas no estado sólido ou líquido com diâmetro menor que $100\mu\text{m}$ que incluem pós, poeiras, fumaças e aerossóis emitidos para atmosfera de diversas maneiras. De acordo com a CETESB (2001), a notação PM_{10} pode ser definida de maneira simplificada como aquela cujo diâmetro aerodinâmico é menor que $10\mu\text{m}$. As partículas inaladas podem ainda ser classificadas como partículas inaláveis finas – $PM_{2,5}$ ($<2,5\mu\text{m}$) e partículas inaláveis grossas ($2,5$ a $10\mu\text{m}$). Os efeitos dessas partículas podem variar muito em função de sua natureza química e de suas dimensões. As partículas finas, devido ao seu tamanho diminuto, podem atingir os alvéolos pulmonares, já as grossas ficam retidas nas vias superiores do sistema respiratório.

A evolução anual das médias mensais diárias da AOD (profundidade ótica de aerossóis) obtidas pelo satélite TERRA do período de 2001 a 2005 (figura 2d), mostra que do início das queimadas da cana-de-açúcar em julho, a concentração de aerossóis mensal aumenta consideravelmente passando por um valor máximo de $AOD = 0,35$ em setembro, o que é equivalente a concentração PM_{10} de $70,0\text{ ug}\cdot\text{m}^{-3}$ (CODATO et al., 2008). Com a entrada do período chuvoso em outubro, a concentração de aerossóis decresce gradativamente, aos valores de $AOD = 0,16$ ou $20,0\text{ ug}\cdot\text{m}^{-3}$ em dezembro. Nos meses do ano seguinte, de janeiro até junho, a concentração de aerossóis continua a decrescer até atingir, no mês de maio, o menor nível de concentração PM_{10} , antes de iniciar o novo ciclo.

3.2 Instrumentação

A irradiância global (G) foi monitorada por um piranômetro Eppley PSP, a irradiância ultravioleta (UV) por um radiômetro CUV-3 da Kipp & Zonen e a

irradiância infravermelha (IV) por um piranômetro Eppley PSP com cúpula seletiva de transmissão na faixa espectral de 0,7 a 3,0 μ m (figura 3). Por sugestão do fabricante, o fator de calibração do piranômetro IV é multiplicado por um fator de 0,92 para corrigir o efeito da transmissão da cúpula no elemento sensível do sensor.



Figura 3. Sensores: (a) piranometro Eppley PSP; (b) radiometro CUV-3 Kipp & Zonen; (c) piranometro Eppley PSP com cúpula seletiva.

A irradiância fotossinteticamente ativa (PAR) utilizada neste trabalho foi gerada pelo método indireto, ou seja, pela diferença entre a irradiância G e a soma das irradiâncias UV e IV medidas na mesma frequência, por meio da equação: $H_{PAR} = H_g - (H_{UV} + H_{IV})$. Na literatura a irradiância PAR pode ser expresso em energia (MJ/m²) e unidade fotobiológica como fóton (μ mol m⁻²s⁻¹), (FRISINA, 2002). Aqui neste trabalho a PAR será expressa em W/m² para irradiância e MJ/m² para irradiações horárias e diárias.

As características operacionais referentes a fator de calibração, intervalo espectral, tempo de resposta, linearidade, resposta ao co-seno e a temperatura dos detectores da radiação global (Eppley PSP), radiômetro ultravioleta (CUV-3 da Kipp & Zonen) e do piranômetro infravermelho da (Eppley) estão apresentados na tabela 1.

Tabela 1. Sensores G, UV e IV e suas características.

Sensores	Global	Ultravioleta	Infravermelho
Marca	Eppley	Kipp & Zonen	Eppley
Fator de Calibração	$\pm 7,45 \mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$	$312 \mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$	$\pm 8,12 \mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$
Range Espectral	295-2800nm	290-400nm	695-2800nm
Tempo de resposta	1s	5ms	2s
Linearidade	$\pm 0,5\%$ (de 0 a $2800 \text{ W}/\text{m}^2$)	< 1%	$\pm 1\%$ (de 0 a $700 \text{ W}/\text{m}^2$)
Co-seno	$\pm 1\%$ ($0 < Z < 70^\circ$) $\pm 3\%$ ($70^\circ \leq Z < 80^\circ$)	< $\pm 10\%$	$\pm 5\%$
Resposta a temperatura	$\pm 1\%$ de -20°C a 40°C	< $\pm 0,1/\text{K}$	$\pm 1\%$ de -20°C a 40°C

A estação de radiometria solar dispõe de radiômetros solares adicionais, os quais são utilizados unicamente para aferição dos equipamentos de rotina. As aferições são realizadas a cada 2 anos pelo método comparativo sugerido pela OMM. Na calibração os novos fatores de correção são calculados pelo processo da média aritmética e/ou de regressão linear passando pela origem.

Na aquisição dos dados é utilizado um Datalogger da Campbell CR23X operando na faixa de 5 segundo de varredura em todos os sensores, obtendo leituras e armazenando de médias de 300 leituras ou 5 minutos. Inicialmente, os dados passam por um controle de qualidade, eliminando-se os valores expúrios, que causariam ausência de correlação e numa segunda etapa, os dados são processados por programas desenvolvidos especificamente para o calculo das radiações horárias, diárias e mensais (figura 4).



Figura 4. Datalogger Campbell modelo CR 23X.

O erro da estimativa da radiação PAR está associado à imprecisão das medidas da radiação global e infravermelha pelos piranômetros da Eppley e do radiômetro UV da Kipp & Zonen: o piranômetro PSP possui uma incerteza da ordem de 1,5% a 2,0%, enquanto que, o radiômetro UV da Kipp & Zonen de 6,0%. Assim a radiação PAR que foi obtida por diferença por meio da equação: $H_{PAR} = H_G - (H_{UV} + H_{IV})$ possui uma incerteza estimada de 10,0%.

3.2.1 Heliógrafo

O instrumento utilizado para medir o brilho solar foi o Heliógrafo de Campbell-Stokes. Este equipamento é formado por uma esfera de vidro maciça e transparente e instalado em um eixo inclinado. Ao ser instalado, deve ser calibrado na direção norte verdadeiro. Abaixo da esfera de vidro contém uma espécie de meia lua, tipo de uma calha onde são colocadas as fitas de papel diariamente chamado de tiras heliográficas onde está impressa a escala horária (WMO, 2006).

Seu princípio de funcionamento é simples, os raios solares chegam até a esfera de vidro, em seguida é gerado um feixe de raio luminoso que incide diretamente no papel, queimando em seqüência que o sol for se movimentando. Ao passar uma nuvem sobre a superfície onde o aparelho está instalado, o feixe de luz é interrompido, sendo assim a tira heliográfica para de queimar. O heliógrafo funciona com três tipos de tiras heliográficas, de acordo com períodos diferentes do ano. A tira curva curta, é utilizada de 13 de outubro a 28 de fevereiro, a tira curva comprida é utilizada de 13 de abril a 31 de agosto e finalmente a tira reta, utilizada em 1 de março a 12 de abril e de 1 de setembro a 12 de outubro. A figura 5a e b apresentam o heliógrafo com as tiras heliográficas.

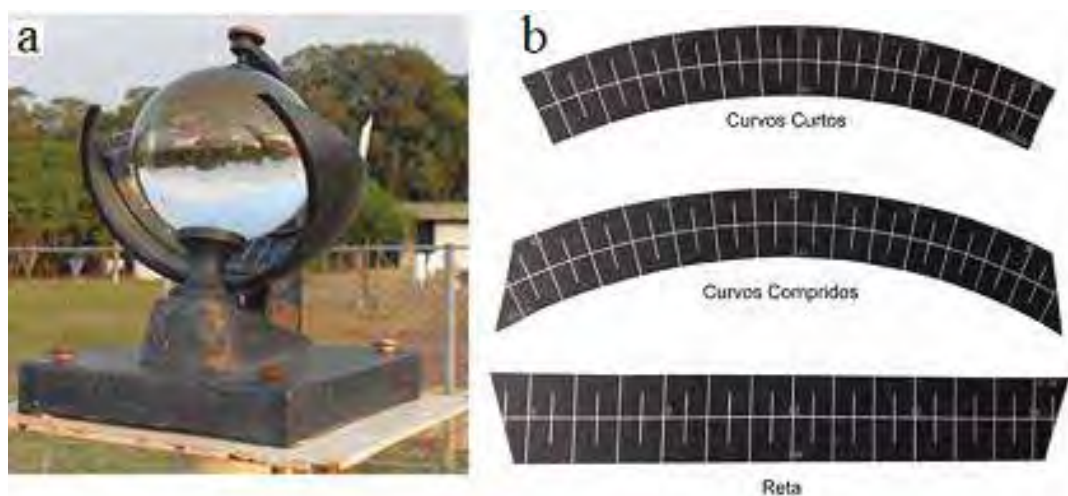


Figura 5. (a) Heliógrafo Campbell-Stokes; (b) Tiras heliográficas.

3.3 Tratamentos dos Dados

Os dados coletados foram submetidos a um controle de qualidade no sentido eliminar valores falsos e ruídos para garantir a qualidade das medidas.

Depois que os dados da radiação G, UV e IV foram coletados, a primeira filtragem é realizada para detectar dias que não houve medidas por motivos de queda de energia na estação ou por fatores climatológicos como fortes chuvas. No caso do heliógrafo foi necessário contabilizar todas as tiras heliográficas utilizadas do período de 2001 a 2005, para que o brilho solar pudesse ser utilizado.

Após esse primeiro estágio, esses dados passam para à próxima etapa de filtragem específica, onde os valores negativos da base de dados detectados durante à noite são excluídos por não terem finalidade de uso nesse projeto. A partir disso, os dados são integrados no dia gerando valores diários, onde são separados em partições anual, sazonal e mensal.

Em seqüência, equações geoespaciais são inseridas para que as correlações entre K_T , K_{TUV} , K_{TPAR} e K_{TIV} com a razão de insolação (n/N) possam ser realizadas. Os valores encontrados pelas correlações geram valores dos coeficientes a e b proposto pela equação linear de estimativa utilizada por (ANGSTRÖM-PRESCOTT, 1924), parabólica a, b e c (AKINOGLU E ECEVIT, 1990; MARTINEZ-LOZANO, 1984), e o índice

de correlação R^2 , onde apresenta qual tipo de equação teve melhor nível de ajustamento obtido nas estimativas. A partir desse processo, os índices estatísticos MBE, RMSE e “d” foram empregados para validar os resultados mostrando qual é o melhor modelo a ser utilizado para estimar as radiações G, UV, PAR e IV.

Todo esse procedimento é realizado através de software computacional, de maneira rápida e eficiente.

3.3.1 Equações Geoespaciais

As equações geoespaciais são fundamentais para os cálculos da radiação solar global. Um dos primeiros parâmetros foi no cálculo da excentricidade da Terra, onde a excentricidade da órbita terrestre é tal que a distância entre o Sol e a Terra varia 1,7% ao longo do ano (SOUZA, 2009). Contudo, o fator de correção da excentricidade da órbita da Terra (E_0) diário pode ser obtido através da equação proposta por Spencer (1971), que apresenta um erro máximo de 0,0001:

$$E_0 = 1,000110 + 0,034221 * \cos \Gamma + 0,001280 * \sen \Gamma + 0,000719 * \cos 2\Gamma + 0,000077 \sen 2\Gamma \quad (4)$$

onde: $\Gamma = 2\pi (DJ - 1) / 366$

Após o cálculo da excentricidade da Terra, foi necessário utilizar a equação do cálculo da radiação solar na superfície horizontal onde:

$$H_0 = I_{SC} E_0 (\sen \delta \sen \phi + (24/\pi) \sen (24/\pi) \cos \delta \cos \phi \cos h) \quad (5)$$

onde, I_{SC} é a constante solar (1367 W/m²), δ é a declinação solar, ϕ a latitude local e h é o ângulo horário.

Conforme Assunção (2003), a Terra possui um eixo de rotação inclinado cerca de 23,45° em relação ao plano normal da Eclíptica, portanto o ângulo entre o

alinhamento Terra - Sol e o plano equatorial muda dinamicamente à medida que a Terra se desloca em sua órbita. A variação deste ângulo é chamado de declinação solar onde:

$$\begin{aligned} \delta = & 0,006918 - 0,399912 * \cos \Gamma + 0,070257 * \sin \Gamma - \\ & 0,006758 * \cos 2\Gamma + 0,000907 * \sin 2\Gamma - \\ & 0,002697 * \cos 3\Gamma + 0,00148 * \sin 3\Gamma \end{aligned} \quad (6)$$

O ângulo horário afeta também a radiação solar, pois à medida que o Sol se eleva no horizonte, a radiação tende a aumentar até atingir um valor máximo ao meio dia solar onde:

$$h = \arccos (- \operatorname{tg} \phi * \operatorname{tg} \delta) \quad (7)$$

Para o modelo de Angström-Prescott o brilho solar (n) e o fotoperíodo (N) foram utilizados como:

$$N = 2 / 15 * h \quad (8)$$

onde N é o comprimento que o dia teve de luz solar e h é o ângulo horário.

3.4 Indicativos Estatísticos

Os indicativos estatísticos MBE (Mean Bias Error), RMSE (Root Mean Square Error), coeficiente de determinação R^2 e “d” de Willmott foram empregados para validação dos modelos.

O MBE é o indicativo que mostra a performance dos modelos ao longo prazo (exatidão) representando o desvio das médias sendo expressa pela equação:

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (Pi - Oi)}{N} \quad (9)$$

onde: P_i são valores estimados, O_i são valores medidos e N é o número de observações.

Quando os valores do MBE indicarem positivo, ocorrem um superestimativa do modelo testado, ou subestimativa quando os valores forem negativos. Quanto menor os valores de MBE, a performance do modelo é melhor, mais este modelo apresenta que, uma superestimativa cancela uma subestimativa.

O RMSE é um indicativo onde apresenta a raiz quadrada do erro quadrático médio (espalhamento) expressa pela equação:

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{N} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

O RMSE informa o valor real do erro gerado pelo modelo, sendo que quanto menores os valores obtidos para desse indicativo, melhor será a performance do modelo (STONE, 1993).

O coeficiente de determinação R^2 mostra a qualidade do ajustamento obtido que indica a proporção da variação de y que mostra a regressão.

O índice de ajustamento “d”, foi utilizado para validar os modelos. Este índice estatístico foi desenvolvido por Willmott (1998), onde comparou várias medidas e estimadas através de comparações, onde a equação abaixo mostra:

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P'_i| - |O'_i|)^2} \quad (11)$$

onde: $|P'_i|$ representa o valor absoluto da diferença $P_i - \bar{O}_i$, enquanto $|O'_i|$ representa o valor absoluto da diferença $O_i - \bar{O}_i$.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Transmissividade Atmosférica das Radiações G, UV, PAR e IV Média Mensal

A tabela 2 e a figura 6, mostram os valores da transmissividade atmosférica média mensal das radiações global ($\bar{K}_T = \bar{G}/\bar{H}_0$), ultravioleta ($\bar{K}_{TUV} = \bar{UV}/\bar{UV}_0$), fotossinteticamente ativa ($\bar{K}_{TPAR} = \bar{PAR}/\bar{PAR}_0$) e infravermelha próxima ($\bar{K}_{TIV} = \bar{IV}/\bar{IV}_0$) diárias, e a evolução anual média mensal da razão de insolação (n/N) diárias, para o período de 2001 a 2004 em Botucatu.

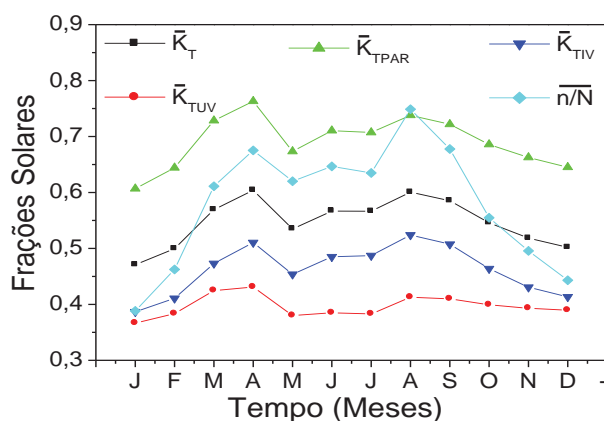
A normalização das radiações global (G), ultravioleta (UV), fotossinteticamente ativa (PAR) e infravermelha (IV) pelas radiações no topo da atmosfera (H_0), (UV_0), (PAR_0) e (IV_0) respectivamente, eliminou a dependência do dia e local nos valores das frações \bar{K}_T , \bar{K}_{TUV} , \bar{K}_{TPAR} e \bar{K}_{TIV} . Assim, a sazonalidade observada nos valores da transmissividade atmosférica das radiações e da razão de insolação mostradas na figura 6, é devido às variações climáticas em Botucatu.

As radiações do topo da atmosfera UV_0 , PAR_0 e IV_0 , utilizada nos cálculos para a obtenção das frações K_T , K_{TUV} , K_{TPAR} e K_{TIV} diárias foram: $UV_0 = 5,7\%$ (FOYO-MORENO et al., 1999), $PAR_0 = 38,8\%$ (ALADOS-ARBOLEDAS et al., 2000) e $IV_0 = 55,5\%$ do total do espectro (100%), obtido pelo método diferença entre o 100% de H_0 e a soma das radiações ($UV_0 + PAR_0$).

Tabela 2. Evolução anual das frações \bar{K}_T , \bar{K}_{TUV} , \bar{K}_{TPAR} e \bar{K}_{TIV} média mensal.

Tempo	\bar{K}_T	\bar{K}_{TUV}	\bar{K}_{TPAR}	\bar{K}_{TIV}	n/N
Janeiro	0,471	0,367	0,607	0,387	0,388
Fevereiro	0,500	0,383	0,644	0,411	0,462
Março	0,569	0,425	0,729	0,473	0,611
Abril	0,604	0,431	0,763	0,511	0,675
Mai	0,535	0,380	0,673	0,454	0,620
Junho	0,567	0,385	0,711	0,485	0,647
Julho	0,567	0,383	0,707	0,487	0,635
Agosto	0,601	0,413	0,738	0,524	0,751
Setembro	0,585	0,410	0,722	0,508	0,678
Outubro	0,546	0,399	0,686	0,464	0,555
Novembro	0,518	0,393	0,663	0,431	0,496
Dezembro	0,502	0,390	0,645	0,413	0,443
Média	0,547	0,397	0,691	0,462	0,580

Comparando-se a evolução das frações \bar{K}_T , \bar{K}_{TUV} , \bar{K}_{TPAR} e \bar{K}_{TIV} com a evolução da razão de insolação (\bar{n}/\bar{N}), fica evidente que a transmissividade atmosférica das radiações G, UV, PAR e IV possui uma dependência com a fração de tempo em que sol ficou exposto na atmosfera: a transmissividade de cada radiação foi mais elevada na condição atmosférica de maior valor da razão de insolação, e ao contrário, foi menos elevada na condição atmosférica de menor valor da razão de insolação. Sob o ponto de vista climático, os valores das frações \bar{K}_T , \bar{K}_{TUV} , \bar{K}_{TPAR} e \bar{K}_{TIV} e da razão de insolação (\bar{n}/\bar{N}) foram menores no período chuvoso, nas estações do verão e primavera, onde as concentrações de nuvens e vapor d'água na atmosfera são maiores no ano.

Figura 6. Frações \bar{K}_T , \bar{K}_{TUV} , \bar{K}_{TPAR} e \bar{K}_{TIV} e razão de insolação (\bar{n}/\bar{N}).

Os maiores valores das frações \bar{K}_T , \bar{K}_{TUV} , \bar{K}_{TPAR} e \bar{K}_{TIV} e da razão de insolação (\bar{n}/\bar{N}) foram no período seco, nas estações do outono e inverno, onde as concentrações de nuvens e vapor d'água na atmosfera são menores e a concentração de aerossóis é maior no ano (figura 2d).

Independentemente da sazonalidade das radiações, a transmissividade atmosférica foi mais elevada para a radiação PAR, decrescendo em seqüência para as radiações global, infravermelha e ultravioleta, respectivamente. A fração \bar{K}_T variou de 47,1% em janeiro a 60,4% em abril, com média geral de 54,7%; a fração \bar{K}_{TUV} variou de 36,6% em janeiro a 43,1% em abril com média geral de 39,7%; \bar{K}_{TPAR} variou de 60,7% em janeiro a 76,3% em abril com média geral de 69,0%, e a fração \bar{K}_{TIV} variou de 38,7% em janeiro a 52,4% em agosto com média geral de 46,2%. A razão de insolação variou de 38,8% em janeiro a 75,0% em agosto, com média geral de 58,0%.

Os resultados obtidos nos meses de janeiro e fevereiro mostram que os elementos climáticos responsáveis pelas menores valores das transmissividades atmosféricas das radiações G, UV, PAR e IV, e menor razão de insolação, foram à nebulosidade, precipitação e vapor d'água, que nestes dois meses atingiram valores acumulados de: 260,7mm e 198mm para precipitação, e $f = 0,61$ e $f = 0,49$ para nebulosidade, respectivamente. Além dos fenômenos microclimáticos (aumento da nebulosidade com chuvas convectivas de verão), o aumento da nebulosidade e precipitação e vapor d'água na atmosfera nesse período têm origem no fenômeno macroclimático denominado *Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS)*. Esse fenômeno é caracterizado como uma faixa de nebulosidade de orientação noroeste-sudeste, que vai desde a Bacia Amazônica até o oceano Atlântico Sul, resultante da convergência de massas de ar quente e úmido oriundas da Bacia Amazônica e do oceano Atlântico Sul. (NOUGÉS-PAEGLES; MO, 1997; LIEBMANN et al., 2001; CARVALHO et al., 2002). A frequência de ocorrência é de duas a quatro vezes ao ano, com duração média de 8 dias e de intensidade variável (FERREIRA et al., 2004; NOGUÉS-PAEGLE; MO, 1997).

O resultado obtido para o mês de abril mostra que a maior transmissividade atmosférica das radiações G, UV, PAR e IV são consequência de um período de transição entre o ZCAS e as entradas de frentes frias vindas da região polar, que limpam as nuvens da atmosfera local. Por outro lado, o decréscimo repentino que ocorrem em maio e

que se entendem nos meses de junho e julho, são devido aos sistemas frontais, resultantes da passagem de frentes frias polares, que geram aumento na nebulosidade e ocorrência de chuvas de média à alta intensidade, principalmente durante o outono, inverno e primavera austrais (SATYAMURTY; MATTOS, 1989; SATYAMURTY et al., 1998). Segundo Lemos & Calbete (1996), ocorrem em média 5 eventos de sistemas frontais por mês no Estado de São Paulo.

O aumento da transmissividade atmosférica das radiações G, UV, PAR e IV e da razão de insolação (\bar{n}/\bar{N}) nos meses de julho, agosto e setembro, é consequência do período seco com elevada concentração de dias de céu claro, típico da região local. O mês de agosto, apesar de ser o mês mais seco do ano e claro, mostra uma pequena anomalia no valor da razão de insolação, sendo muito elevado, sem que houvesse uma mudança na transmissividade das radiações na mesma proporcionalidade. É possível que esse efeito seja devido à elevada concentração de aerossóis na atmosfera que absorveu e espalhou mais as radiações UV e PAR que a IV. Se for comparado à proporcionalidade entre o aumento de G, UV, PAR e IV com o aumento de (\bar{n}/\bar{N}), entre os meses de abril e agosto, pode-se constatar que a fração \bar{K}_{TIV} não foi afetada por aerossóis, e foi a única das quatro frações que aumentou em relação ao aumento desproporcional de (\bar{n}/\bar{N}). Para uma variação de (\bar{n}/\bar{N}) de 60,4% para 75,0% em agosto, a fração \bar{K}_{TIV} aumentou de 67,5% para 75,0%, enquanto que, as frações \bar{K}_T , \bar{K}_{TUV} e \bar{K}_{TPAR} tiveram seus valores diminuídos de 60,4% para 60,0%, 4,31% para 4,13%, 76,3% para 74,0% respectivamente.

4.2 Equações de Estimativa Linear e Parabólicas das Frações K_T , K_{TUV} , K_{TPAR} e K_{TIV} em função da Razão de Insolação (n/N) Anual e Validação

A figura 7, apresenta as correlações para agrupamentos das radiações G, UV, PAR e IV diárias em função da razão de insolação (n/N) diária para a base de dados diárias do período de 2001 a 2004. Dois tipos de equações foram ajustados nas correlações pela técnica estatística de regressão: linear do tipo $Y = a + bX$, e a parabólica de segundo grau do tipo $Y = a + bX + cX^2$. As equações lineares e parabólicas obtidas estão apresentadas nas tabelas 3 e 4 com respectivos coeficientes de determinação R^2 .

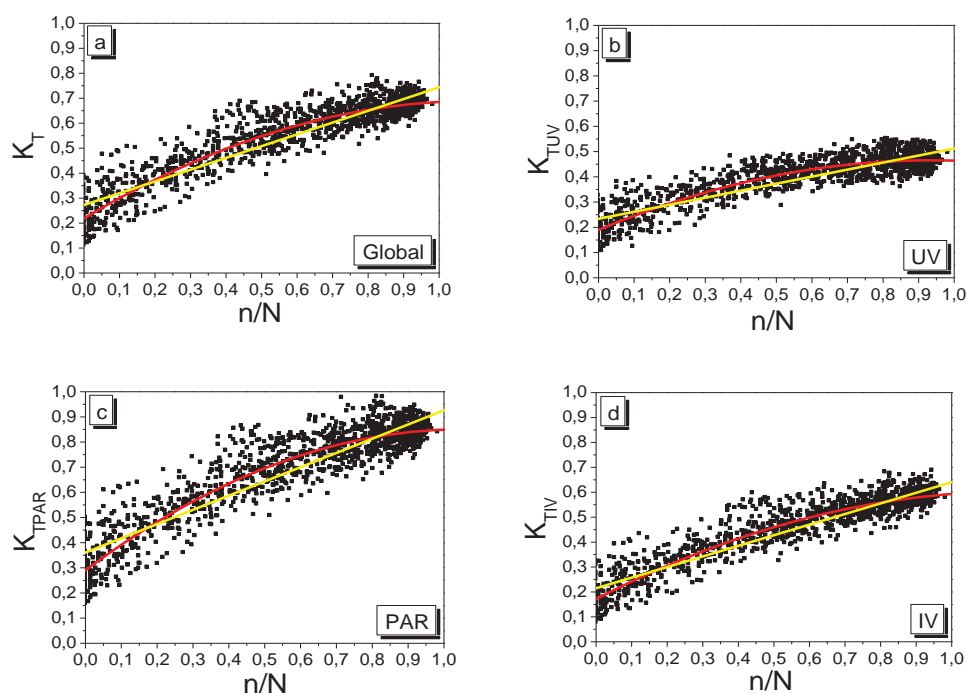


Figura 7. Correlação das frações K_T , K_{TUV} , K_{TPAR} e K_{TIV} em função da razão de insolação (n/N) para agrupamento de dados anuais.

Tabela 3. Equações de estimativa linear das radiações G, UV, PAR e IV anual.

Rad.	Equações Lineares - Anual	R^2
G	$(K_T) = 0,273 + 0,471 (n/N)$	0,843
UV	$(K_{TUV}) = 0,234 + 0,279 (n/N)$	0,749
PAR	$(K_{TPAR}) = 0,361 + 0,566 (n/N)$	0,826
IV	$(K_{TIV}) = 0,215 + 0,426 (n/N)$	0,852

Tabela 4. Equações de estimativa parabólica das radiações G, UV, PAR e IV anual.

Rad.	Equações Parabólicas de Segundo Grau - Anual	R^2
G	$(K_T) = 0,219 + 0,852 (n/N) - 0,386 (n/N)^2$	0,877
UV	$(K_{TUV}) = 0,190 + 0,590 (n/N) - 0,316 (n/N)^2$	0,808
PAR	$(K_{TPAR}) = 0,290 + 1,064 (n/N) - 0,505 (n/N)^2$	0,866
IV	$(K_{TIV}) = 0,171 + 0,731 (n/N) - 0,310 (n/N)^2$	0,880

O resultado foi melhor na seqüência para as radiações IV, G, PAR e UV, onde o coeficiente de determinação variou entre os valores $R^2 = 0,749$ obtida para radiação UV a $R^2 = 0,852$ para radiação IV. O coeficiente de determinação R^2 das equações lineares apresentados na tabela 3, expressa uma correlação estatística significativa entre a

transmissividade das radiações G, UV, PAR e IV, e a razão de insolação (n/N) na atmosfera local. O valor do coeficiente de determinação $R^2 = 0,843$ obtido para a radiação global está em concordância com valores de R^2 obtidos para outros locais apresentado posteriormente junto aos coeficientes de determinação a e b na tabela 5.

No modelo de Ångström-Prescott (ÅNGSTRÖM, 1924; Prescott, 1940), a estimativa da radiação H_G em função de (n/N) depende do local e dia. Assim a variação de H_G é resultante também da variação dos parâmetros climáticos (nebulosidade, vapor d' água, aerossóis e outros) de um local para o outro. Na equação, os valores dos coeficientes a e b além da dependência concentração de nuvens, vapor d' água na atmosfera e aerossóis (poluição) na atmosfera, os coeficientes a e b variam predominantemente em função dos seguintes fatores: latitude, altitude, albedo da superfície, elevação solar (MARTÍNEZ-LOZANO et al., 1984). Os valores de $a = 0,273$ (fator de intercepto) e $b = 0,471$ (coeficiente angular) da equação linear da tabela 3 indicam que a transmissividade mínima (a) e a máxima (a + b) em Botucatu é da ordem de 27,3% e 74,4% respectivamente. Os valores do coeficiente de $a = 0,273$ (fator de intercepto) e $b = 0,471$ (coeficiente angular) da equação linear de Ångström-Prescott e R^2 obtidos para Botucatu são inferiores, iguais e superiores a outras localidades que é apresentado na tabela 5 e 6.

Tabela 5. Valores de a, b e R^2 obtidos em outras localidades no Brasil.

Autor	a	b	R^2	Localidade
Blanco & Sentelhas (2002)	0,231	0,500	0,844	Piracicaba - SP
Corrêa & Escobedo (2011)	0,237	0,471	0,843	Botucatu - SP
Conceição & Mandelli (2006)	0,220	0,600	0,890	Bento Gonçalves - RS
Dantas et al. (2003)	0,230	0,490		Lavras - MG
Dallacort et al. (2004)	0,206	0,391	0,839	Palotina - PR
Dornelas et al. (2006)	0,278	0,498	0,928	Brasília - DF
Ferreira W.P.M. (2008)	0,283	0,451	0,875	Sete Lagoas - MG
Fontana & Oliveira (1996)	0,350	0,460		Pelotas - RS
Fontana & Oliveira (1996)	0,270	0,320		Rio Grande - RS
Santos et al. (2003)	0,260	0,471	0,807	Ilha Solteira - SP
Torres et al. (2010)	0,368	0,268	0,993	Canavieiras - BA

Tabela 6. Localidades, coordenas e clima no Brasil.

Localidade	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Clima
Bento Gonçalves - RS	29°09'S	51°31'O	640	Cfa
Botucatu - SP	22°53'S	48°26'O	804	Cwa
Brasília - DF	15°56'S	48°8'O	997	Cwa
Canavieiras - BA	15°40'S	38°56'O	5	Aw
Ilha Solteira - SP	20°25'S	51°21'O	335	Aw
Lavras - MG	21°13'S	45°58'O	918	Cwa
Palotina - PR	24°17'S	53°50'O	333	Cfa
Pelotas - RS	31°46'S	52°20'O	7	Cfa
Piracicaba - SP	22°42'S	47°38'O	546	Cwa
Rio Grande - RS	32°2'S	52°5'O	1	Cfa
Sete Lagoas - MG	19°28'S	44°15'O	732	Cwa

A cidade de Brasília possui valores de a e b superiores a de Botucatu com 27,8% de transmissividade mínima (a) e 77,6% de máxima (a + b). Essa diferença ocorre devido a uma pequena diferença de altitude já que a classificação climática é a mesma.

Para a cidade de Canavieiras, os valores dos coeficientes de transmissividade mínima (a) igual a 36,8% e máxima (a + b) igual a 63,6%, são inferiores ao encontrados em Botucatu. O motivo da diferença é o clima, cuja classificação é do tipo Aw (tropical com inverno seco) e a baixa altitude. Em Palotina, os valores de (a) é 20,6% e (a + b) de 59,7%, ou seja, valores inferiores aos de Botucatu, muito provavelmente, devido às diferenças do clima Cfa (temperado úmido com verão quente) e também as coordenadas geográfica, altitude que é inferior e latitude que é superior.

Pode-se observar que o maior valor do coeficiente (a) obtidos na literatura é de lugares onde existem maior nebulosidade, vapor d' água e altitude. Em lugares de altitudes mais elevadas os valores de (a + b) se mantém com alto índice de claridade, apresentando um céu mais claro.

O coeficiente de determinação R^2 das equações parabólicas apresentados na tabela 4, também expressa uma significativa correlação estatística entre a transmissividade das radiações G, UV, PAR e IV e a razão de insolação (n/N) na atmosfera local. A comparação entre os coeficientes de determinação R^2 dos dois modelos apresenta que o ajuste foi melhor para a equação parabólica para as quatro radiações. Similarmente, o valor de R^2 foi melhor na seqüência para as radiações IV, G, PAR e UV, onde o coeficiente de determinação variou entre os valores $R^2 = 0,808$ obtida para radiação UV a $R^2 = 0,880$ para

radiação IV. O valor do coeficiente de determinação $R^2 = 0,877$ obtido para a radiação global está em concordância com valores de R^2 obtidos para outros locais como apresenta a tabela 7.

Tabela 7. Valores a, b, c e R^2 obtidos em algumas localidades no exterior.

Autor	a	b	c	R^2	Localidade
Almorox J. & Hontoria C. (2004)	0,184	0,680	-0,123	0,865	Madrid - ES
Ampratwum & Dorvlo (1999)	-5,366	13,265	-7,252	0,760	Marmul - OM
Ampratwum & Dorvlo (1999)	0,191	0,328	0,052	0,834	Sur - OM
Ampratwum & Dorvlo (1999)	0,942	-1,202	0,933	0,733	Seeb - OM
Bakirci K. (2009)	0,203	0,396	-0,058	0,981	Eskisehir - TR
Bakirci K. (2009)	0,305	0,197	0,197	0,822	Trabzon - TR
Corrêa & Escobedo (2011)	0,219	0,852	-0,386	0,877	Botucatu - BR

Tabela 8. Localidades, coordenadas e climas no exterior.

Localidade	Latitude °	Longitude °	Altitude (m)	Clima
Botucatu – SP	22°53'S	48°26'O	804	Cwa
Eskisehir – TR	39°47'N	30°31'L	800	Bsk
Madrid – ES	40°23'N	03°40'O	665	BSh
Marmul – OM	18°08'N	55°11'L	269	BWk
Seeb – OM	23°35'N	58°17'L	15	BWk
Sur – OM	22°32'N	59°28'L	14	BWh
Trabzon – TR	41°00'N	39°43'L	30	Cfa

Os valores de K_T declarados nas tabelas 7 e 8, mostram que a cidade de Eskisehir obtém valores dos coeficientes a, b e c diferentes de Botucatu. A razão pela qual o clima continental seco e a latitude são responsáveis pela baixa nebulosidade, precipitação ao longo do ano e fotoperíodo (BAKIRCI, 2009).

Em Madrid, os valores do K_T mostram que os coeficientes a, b e c também são diferentes, pelo motivo da baixa altitude, do clima mediterrânico continentalizado, baixa precipitação, nebulosidade e fotoperíodo (ALMOROX; HONTORIA, 2004).

Para validação do modelo linear foi usada uma base de dados de radiações G, UV, PAR e IV medidos no ano 2005 em Botucatu. Os indicadores estatísticos MBE, RMSE e coeficiente “d” de ajustamento foram utilizados na comparação entre os modelos estimados e os medidos onde, estão apresentados na tabela 9.

O indicativo MBE mostra por meio do sinal positivo, que a estimativa das radiações G, UV, PAR e IV superestimam a medida. Entre as radiações, o melhor desempenho foi para as radiações em seqüência PAR, G, IV e UV respectivamente. Na estimativa, a radiação G superestima a medida em 3,3%; a UV em 6,0%, a PAR em 1,6% e a IV em 4,9%, respectivamente. Os valores inferiores a $\pm 6,0\%$ foram significativos estatisticamente, pois são da MBE é da ordem de grandeza do erro experimental.

O indicativo estatístico RMSE variou até um valor máximo de 13,6%. Entre as radiações o RMSE foi aproximadamente iguais com pequena vantagem no desempenho em seqüência para as radiações: G (10,7%), PAR (10,8%), IV (11,6%) e a UV (13,6%). O resultado obtido para o espalhamento foi considerado estatisticamente significativo, pois é inferior aos valores de RMSE citados na literatura para diferentes validações de modelos de estimativas em diferentes locais e com outras radiações. O coeficiente “d” de Willmott superior a 0,946 mostram bom nível de ajustamento da estimativa das radiações G, UV, PAR e IV em relação à medida.

A razão principal pelo qual o ajuste da UV foi menos significativo que as demais radiações, foi a medida da UV do ano de 2005, na qual foi inferior a medida média do período 2001 a 2004, a qual foi utilizado na modelagem, como mostra a figura 8.

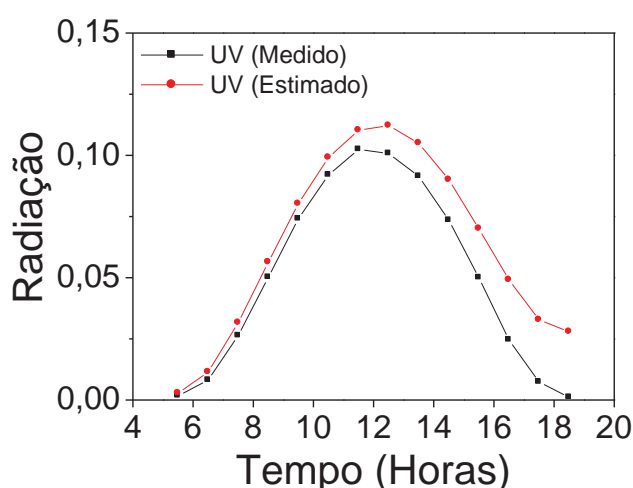


Figura 8. Evolução diurna das médias diárias da radiação UV medido com o modelo estimado.

Tabela 9. Validação das equações lineares geradas para 2001 a 2004 e validadas no ano de 2005.

Modelo	MBE (MJ m ⁻²)	RMSE (MJ m ⁻²)	MBE (%)	RMSE (%)	d
G	0,566	1,837	3,306	10,720	0,970
UV	0,042	0,094	6,010	13,615	0,946
PAR	0,135	0,920	1,587	10,780	0,968
IV	0,391	0,916	4,939	11,581	0,968

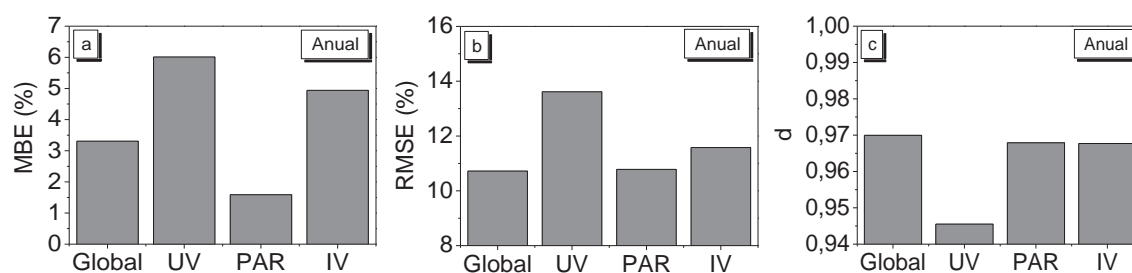


Figura 9. Índices estatísticos MBE, RMSE e “d” do modelo linear gerados na validação anual de 2005.

Os resultados obtidos na validação dos modelos de transmissividade com os dados do ano de 2005 mostraram que os valores de MBE foram positivos, indicando, portanto uma superestimativa sistemática nas medidas. Como a atmosfera apresenta fenômenos dinâmicos e complexos, a concentração de nuvens e material particulado pode ser variável de ano para ano e, conseqüentemente, modificar o padrão de interação da radiação com a atmosfera, produzindo assim níveis de transmissividade diferentes. A Figura 10 mostra o padrão de transmissividade das radiações global, ultravioleta, par e infravermelha para os anos de 2001, 2002, 2003 e 2004 da modelagem, o valor médio com desvio-padrão e o ano de 2005 utilizado na validação.

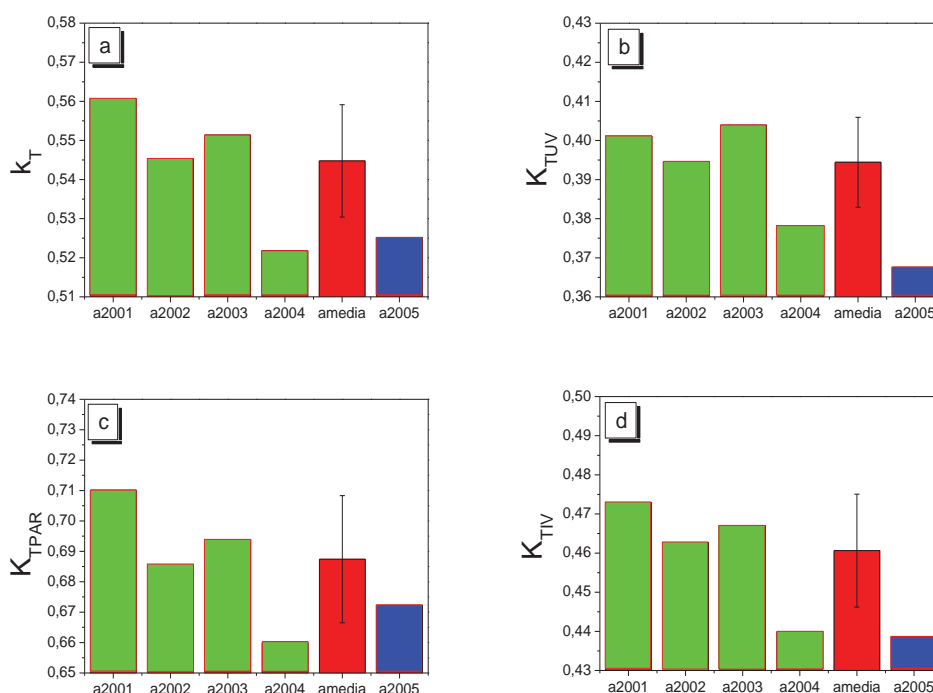


Figura 10. Média de cada ano das frações K_T , K_{TUV} , K_{TPAR} e K_{TIV} e média das médias dos anos com desvio padrão.

As variações de transmissividade entre os anos utilizados na construção dos modelos mostraram níveis bem diferentes e, portanto foram representadas por uma média com desvio padrão. A figura 10 mostra que para o período de 2001 a 2004, os maiores valores foram: $K_T = 56\%$ para o ano de 2001; $K_{TUV} = 40\%$ para o ano de 2003; $K_{TPAR} = 71\%$ para o ano de 2001 e $K_{TIV} = 47\%$ para o ano de 2001. Os menores valores ocorreram no ano de 2004 para todas as transmissividades atingindo valores de: $K_T = 52\%$, $K_{TUV} = 36\%$, $K_{TPAR} = 66\%$ e $K_{TIV} = 43\%$. A transmissividade apresentada para as 4 radiações para o ano de 2005, ano utilizado na validação, mostra que os níveis de transmissividade são inferiores às transmissividades apresentadas pelo valor médio da modelagem. Para 2005, os valores encontrados das transmissividades K_T , K_{TUV} , K_{TPAR} e K_{TIV} foram respectivamente: 52% para K_T ; 36% para K_{TUV} ; 67% para K_{TPAR} e 43% para K_{TIV} , enquanto que os valores médios da modelagem foram, respectivamente: 54% para K_T ; 39% para K_{TUV} ; 68% para K_{TPAR} e 46% para K_{TIV} . Portanto, neste caso, justificam-se as superestimativas encontradas, visto que os

valores de transmissividade obtidos via modelagem tendem a serem superiores aos valores encontrados na validação.

A validação do modelo parabólico também foi usada a base de dados de radiações G, UV, PAR e IV medidos no ano 2005 em Botucatu. Os indicadores estatísticos MBE, RMSE e coeficiente “d” de ajustamento estão apresentados na tabela 10. Similarmente a validação do modelo linear, o indicativo MBE obtido do modelo parabólico, mostram que a estimativa das radiações G, UV, PAR e IV superestimam a medida. Entre as radiações, o melhor desempenho foi para as radiações em sequência PAR, G, IV e UV, respectivamente. Na estimativa, a radiação G superestima a medida em 3,3%; a UV em 6,1%, a PAR em 1,6% e a IV em 5,0%, a medida, respectivamente. Os valores inferiores a $\pm 6,1\%$ também foram significativos estatisticamente, pois são da MBE é da ordem de grandeza do erro experimental.

O indicativo estatístico RMSE variou até um valor máximo de 12,86%. Entre as radiações o RMSE, apresenta melhor desempenho para a radiação PAR com valor de 9,9% e as demais radiações foram aproximadamente iguais com G = 10,1%, a IV = 11,2% e a UV = 12,8%. Igualmente ao resultado obtido para o espalhamento na validação linear, o espalhamento do modelo parabólico foi considerado estatisticamente significativo, pois é inferior aos valores de RMSE citados na literatura para diferentes validações de modelos de estimativas em diferentes locais e com outras radiações. O coeficiente “d” de Willmott superior a 0,948 mostra bom nível de ajustamento da estimativa das radiações G, UV, PAR e IV em relação à medida. Os valores do coeficiente “d” para o modelo parabólico é um pouco superior ao obtido na validação do modelo linear.

Tabela 10. Validação das equações parabólicas geradas para 2001 a 2004 e validadas no ano de 2005.

Modelo	MBE (MJ m ⁻²)	RMSE (MJ m ⁻²)	MBE (%)	RMSE (%)	d
Global	0,575	1,726	3,358	10,073	0,975
UV	0,042	0,089	6,071	12,860	0,955
PAR	0,140	0,849	1,640	9,955	0,974
IV	0,395	0,884	4,988	11,178	0,971

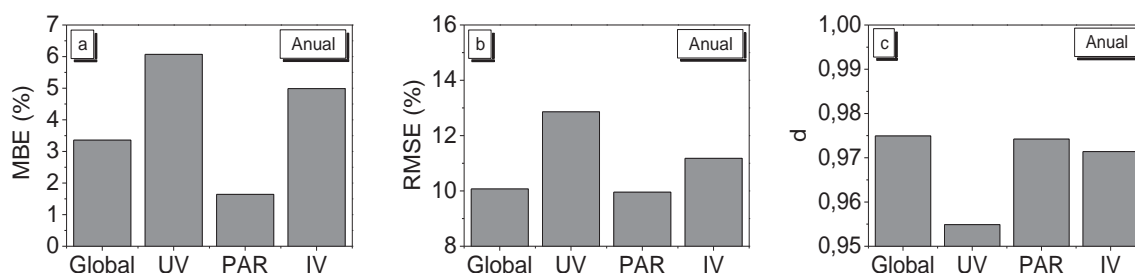


Figura 11. Índices estatísticos MBE, RMSE e “d” do modelo parabólico, gerados na validação anual de 2005.

Da análise do modelo linear e parabólico, os resultados mostram que o ajuste foi melhor no modelo parabólico em todas as radiações G, UV, PAR e IV, sendo assim, o modelo parabólico foi escolhido para estudo nas partições sazonal e mensal.

4.3 Equação de Estimativa Parabólica das Frações K_T , K_{TUV} , K_{TPAR} e K_{TIV} em Função da Razão de Insolação (n/N) Sazonal e Validação

As figuras 12, 13, 14 e 15 (a, b, c e d) mostram as correlações parabólicas entre a transmissividade das radiações G (K_T), UV (K_{TUV}), PAR (K_{TPAR}) e IV (K_{TIV}) em função da razão de insolação (n/N) nas quatro estações do ano: verão, outono, inverno e primavera.

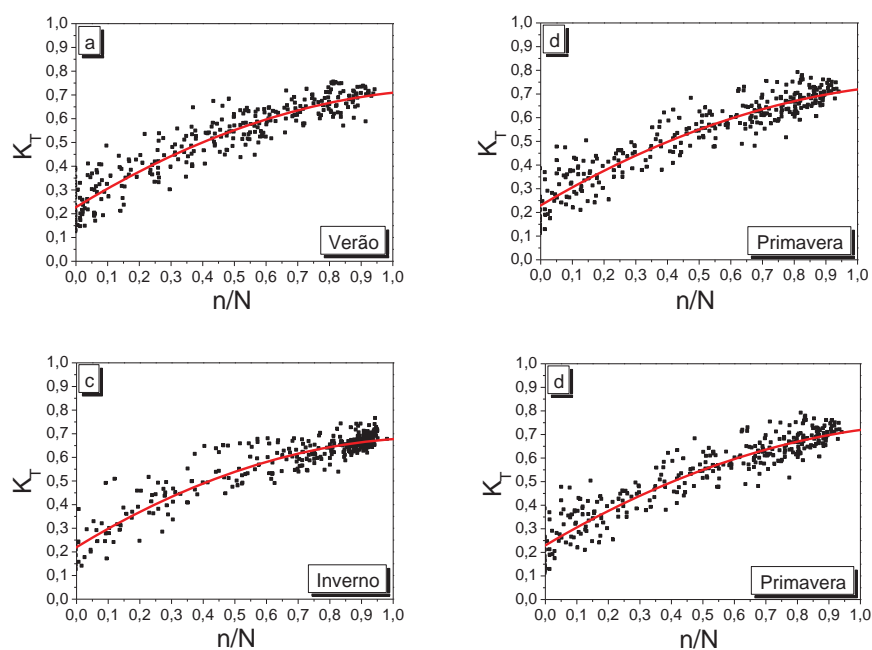


Figura 12. Correlação da fração K_T em função da razão de insolação (n/N) para agrupamento de dados sazonais.

Nas estações do outono e inverno, a concentração de pontos é maior na região onde é a transmitividade da radiação G , UV, PAR e IV e a razão de insolação (n/N) apresentam valores mais elevados. Esses resultados mostram que nessas duas estações, a frequência de dias claros é maior que dias com coberturas de céu, parcialmente nublado e nublado. Nas estações da primavera e verão, a distribuição dos pontos está mais uniforme com espalhamento melhor distribuído ao longo da curva de regressão. Esses resultados mostram que na primavera e no verão, existe uma distribuição aproximadamente igual das três coberturas de céu.

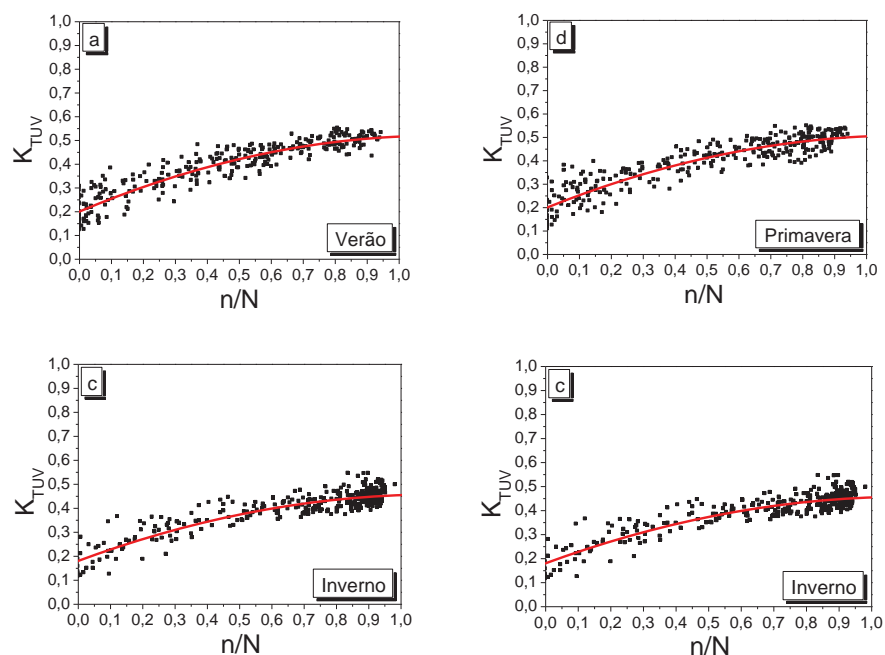


Figura 13. Correlação da fração K_{TUV} em função da razão de insolação (n/N) para agrupamento de dados sazonais.

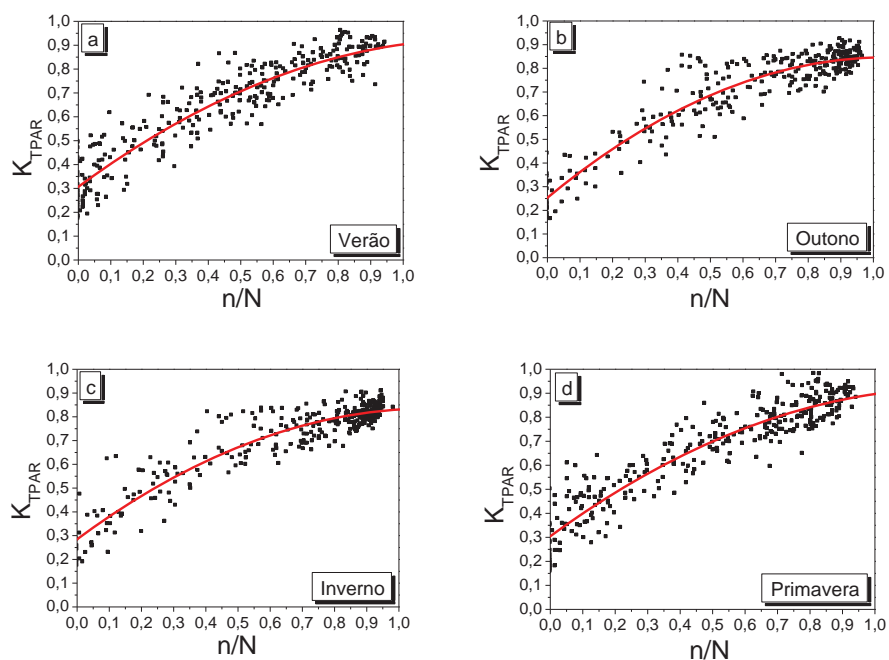


Figura 14. Correlação da fração K_{TPAP} em função da razão de insolação (n/N) para agrupamento de dados sazonais.

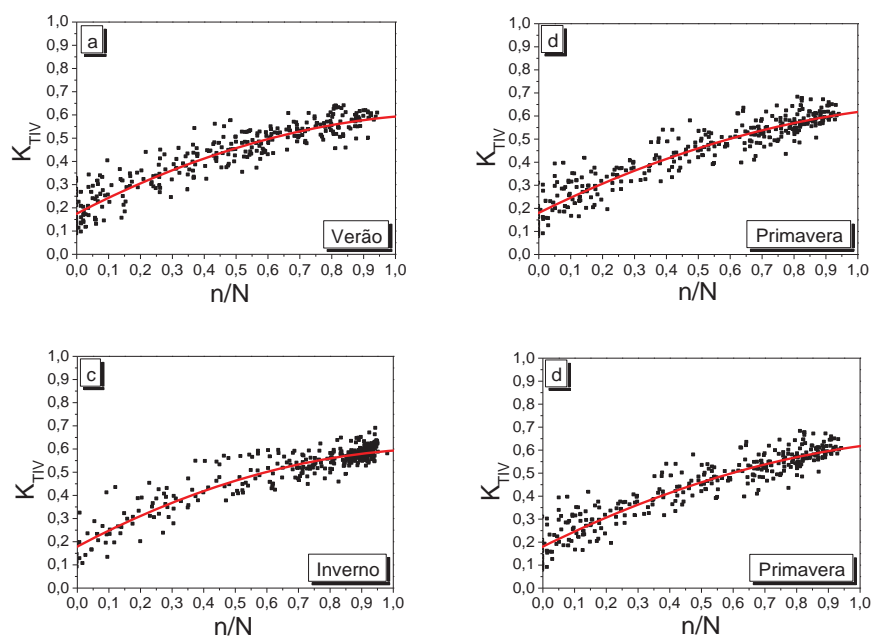


Figura 15. Correlação da fração K_{TIV} em função da razão de insolação (n/N) para agrupamento de dados sazonais.

As equações parabólicas sazonais obtidas para a radiação G, UV, PAR e IV estão apresentadas na tabela 11.

Tabela 11. Equações de estimativa parabólicas de 2º grau da radiação G, UV, PAR e IV sazonal.

Rad.	Estações	Equações Parabólicas de 2º Grau	R ²
G	Verão	$(K_T) = 0,227 + 0,816 (n/N) - 0,334 (n/N)^2$	0,874
	Outono	$(K_T) = 0,190 + 0,918 (n/N) - 0,432 (n/N)^2$	0,887
	Inverno	$(K_T) = 0,220 + 0,817 (n/N) - 0,360 (n/N)^2$	0,867
	Primavera	$(K_T) = 0,230 + 0,791 (n/N) - 0,302 (n/N)^2$	0,878
UV	Verão	$(K_{TUV}) = 0,200 + 0,567 (n/N) - 0,251 (n/N)^2$	0,863
	Outono	$(K_{TUV}) = 0,168 + 0,608 (n/N) - 0,319 (n/N)^2$	0,856
	Inverno	$(K_{TUV}) = 0,181 + 0,498 (n/N) - 0,223 (n/N)^2$	0,812
	Primavera	$(K_{TUV}) = 0,201 + 0,544 (n/N) - 0,240 (n/N)^2$	0,835
PAR	Verão	$(K_{TPAR}) = 0,306 + 1,004 (n/N) - 0,406 (n/N)^2$	0,873
	Outono	$(K_{TPAR}) = 0,253 + 1,138 (n/N) - 0,546 (n/N)^2$	0,879
	Inverno	$(K_{TPAR}) = 0,285 + 1,002 (n/N) - 0,456 (n/N)^2$	0,864
	Primavera	$(K_{TPAR}) = 0,305 + 0,986 (n/N) - 0,393 (n/N)^2$	0,872
IV	Verão	$(K_{TIV}) = 0,175 + 0,710 (n/N) - 0,292 (n/N)^2$	0,872
	Outono	$(K_{TIV}) = 0,147 + 0,797 (n/N) - 0,363 (n/N)^2$	0,887
	Inverno	$(K_{TIV}) = 0,179 + 0,722 (n/N) - 0,308 (n/N)^2$	0,861
	Primavera	$(K_{TIV}) = 0,180 + 0,682 (n/N) - 0,245 (n/N)^2$	0,877

O coeficiente de determinação R² das equações parabólicas sazonais da radiação G, UV, PAR e IV apresentados na tabela 11, expressa uma significativa correlação estatística entre a transmissividade da radiação G, UV, PAR e IV e a razão de insolação (n/N) na atmosfera local. A comparação entre os coeficientes de determinação R² dos modelos apresenta que o ajuste foi ligeiramente melhor na seqüência dos períodos, outono, primavera, verão e inverno para a radiação G; para a radiação UV foi, verão, outono, primavera e inverno; para a radiação PAR foi outono, verão, primavera e inverno e para a radiação IV foi na seqüência, outono, primavera, verão e inverno. O maior valor foi no período de outono para as radiações G, PAR e IV onde o coeficiente de determinação foi de R² = 0,887 para a radiação G, R² = 0,879 para a PAR e para a IV foi R² = 0,887, para a radiação UV o maior valor foi no período do verão onde o R² = 0,864 e os menores foram no inverno para todas as radiações com R² = 0,867 para G, R² = 0,812 para UV, R² = 0,864 para PAR e R² = 0,861 para o IV.

Na tabela 12 os indicativos estatísticos apresentam bons resultados gerados no período sazonal.

Tabela 12. Validação das equações parabólicas sazonais da radiação G, UV, PAR e IV aplicadas no período sazonal de 2005.

Rad.	Período	MBE (MJ m ⁻²)	RMSE (MJ m ⁻²)	MBE(%)	RMSE(%)	d
G	Verão	0,669	2,084	3,437	10,704	0,975
	Outono	0,470	1,312	3,060	8,549	0,980
	Inverno	0,359	1,307	2,263	8,243	0,967
	Primavera	0,911	2,133	4,928	11,540	0,966
UV	Verão	0,034	0,091	3,998	10,691	0,966
	Outono	0,033	0,063	5,516	10,441	0,966
	Inverno	0,050	0,072	8,621	12,330	0,920
	Primavera	0,067	0,107	8,661	8,661	0,937
PAR	Verão	0,197	1,001	2,002	10,169	0,975
	Outono	0,149	0,624	1,963	8,228	0,981
	Inverno	0,114	0,636	1,488	8,297	0,964
	Primavera	0,200	0,971	2,131	10,355	0,970
IV	Verão	0,439	1,047	4,993	11,923	0,972
	Outono	0,287	0,661	4,015	9,229	0,979
	Inverno	0,195	0,633	2,560	8,324	0,969
	Primavera	0,647	1,157	7,760	13,864	0,957

A tabela 12 mostra os indicativos MBE, RMSE e “d” para as radiações G, UV, PAR e IV. Para a radiação G, o indicativo MBE, mostra por meio do sinal positivo, que houve uma superestima a medida. O melhor desempenho das estações do ano foi em seqüência: inverno, outono, verão e primavera. A estimativa de radiação G superestima a medida em 2,3% para inverno, outono em 3,0%, o verão em 3,4% e primavera em 5,0%. Os valores inferiores a $\pm 6,0\%$ são significativos estatisticamente, pois são da MBE é da ordem de grandeza do erro experimental. O indicativo estatístico RMSE variou até um valor máximo de 11,5%. Para a radiação G, o valor de RMSE foi aproximadamente igual ou com pequena vantagem para as estações em seqüência: inverno (8,2%), outono (8,5%), verão (10,7%) e a primavera (11,5%). O coeficiente “d” de Willmott superior a 0,966 ou próximo mostra bom nível de ajustamento da estimativa da radiação G em relação à medida no período sazonal.

O indicativo MBE mostra por meio do sinal positivo, que a estimativa da radiação UV superestima a medida no período sazonal em 4,0% para o verão, para o outono em 5,5%, para o inverno em 8,6% e para a primavera em 8,7%, respectivamente. Os valores

inferiores a $\pm 9,0\%$ foram significativos estatisticamente. O indicativo estatístico RMSE variou até um valor máximo de 12,3%. Entre o período sazonal da radiação UV, os RMSE foram aproximadamente iguais com pequena vantagem no desempenho em seqüência para os períodos: primavera (8,7%), outono (10,4%), verão (10,7%) e o inverno (12,3%). O resultado obtido para o espalhamento foi considerado estatisticamente significativo. O coeficiente “d” foi superior a 0,920 mostram bom nível de ajustamento da estimativa da radiação UV.

Na estimativa da radiação PAR, o indicativo MBE, mostra que a estimativa da radiação PAR superestima a medida no período sazonal. Neste período, o melhor desempenho das estações do ano foi em seqüência: inverno (1,5%), outono (2,0%), verão (2,0%) e primavera (2,1%). Os valores inferiores a $\pm 3,0\%$ foram significativos estatisticamente, pois são de grandeza do erro experimental. O indicativo estatístico RMSE variou até um valor máximo de 10,4%. Entre o período sazonal da radiação PAR, os RMSE foram aproximadamente iguais com pequena vantagem no desempenho em seqüência para os períodos: outono (8,2%), inverno (8,3%), verão (10,1%) e a primavera (10,4%). O resultado obtido para o espalhamento foi considerado estatisticamente significativo. O coeficiente “d” superior a 0,964 mostram bom nível de ajustamento da estimativa da radiação PAR em relação à medida no período sazonal.

O indicativo MBE mostra que a estimativa da radiação IV superestima a medida no período sazonal, obtendo o melhor desempenho das estações do ano na seqüência: inverno (2,5%), outono (4,0%), verão (5,0%) e primavera (7,8%). Os valores inferiores a $\pm 8,0\%$ foram significativos estatisticamente. O indicativo estatístico RMSE variou até um valor máximo de 13,8%. Entre o período sazonal da radiação IV, os RMSE foram aproximadamente iguais com pequena vantagem no desempenho em seqüência para os períodos: inverno (8,3%), outono (9,2%), verão (12,0%) e a primavera (13,8%). O resultado obtido para o espalhamento foi considerado estatisticamente significativo. O coeficiente “d” superior a 0,957 mostram bom nível de ajustamento da estimativa da radiação IV em relação à medida no período sazonal.

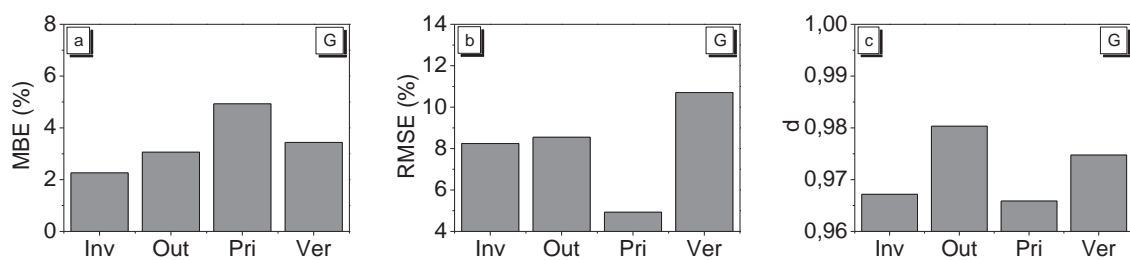


Figura 16. Índices estatísticos MBE, RMSE e “d” da radiação G, gerados na validação sazonal de 2005.

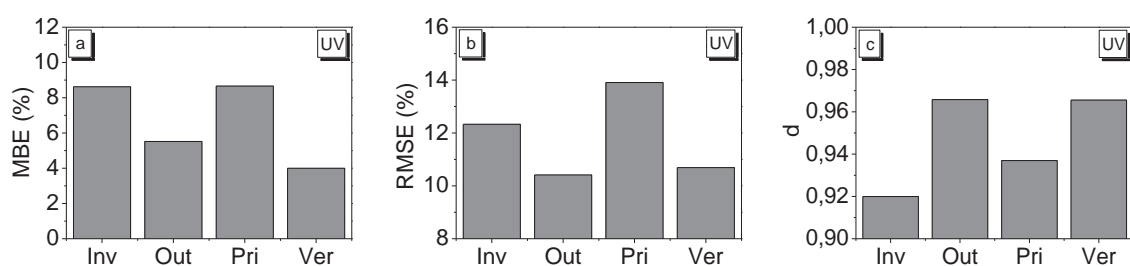


Figura 17. Índices estatísticos MBE, RMSE e “d” radiação UV, gerados na validação sazonal de 2005.

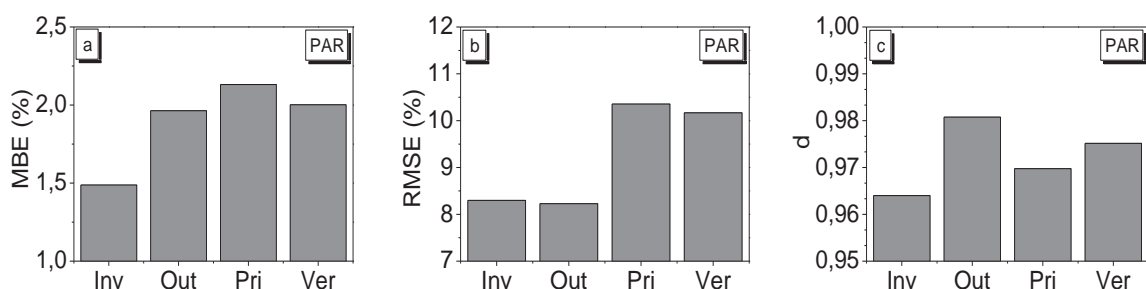


Figura 18. Índices estatísticos MBE, RMSE e “d” radiação PAR, gerados na validação sazonal de 2005.

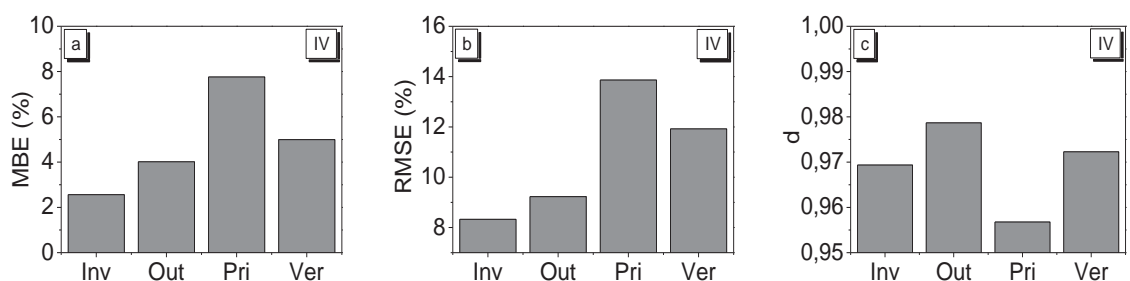


Figura 19. Índices estatísticos MBE, RMSE, e “d” da radiação IV, gerados na validação sazonal de 2005.

4.4 Equações de Estimativa Parabólica das Frações K_T , K_{TUV} , K_{TPAR} e K_{TIV} em Função da Razão de Insolação (n/N) Mensal e Validação

As figuras 20, 21, 22 e 23, mostram as correlações parabólicas entre a transmissividade das radiações G (K_T), UV (K_{TUV}), PAR (K_{TPAR}) e IV (K_{TIV}) em função da razão de insolação (n/N) nos meses do ano: janeiro, fevereiro, março, abril, maio, junho, julho, agosto, setembro, outubro, novembro e dezembro.

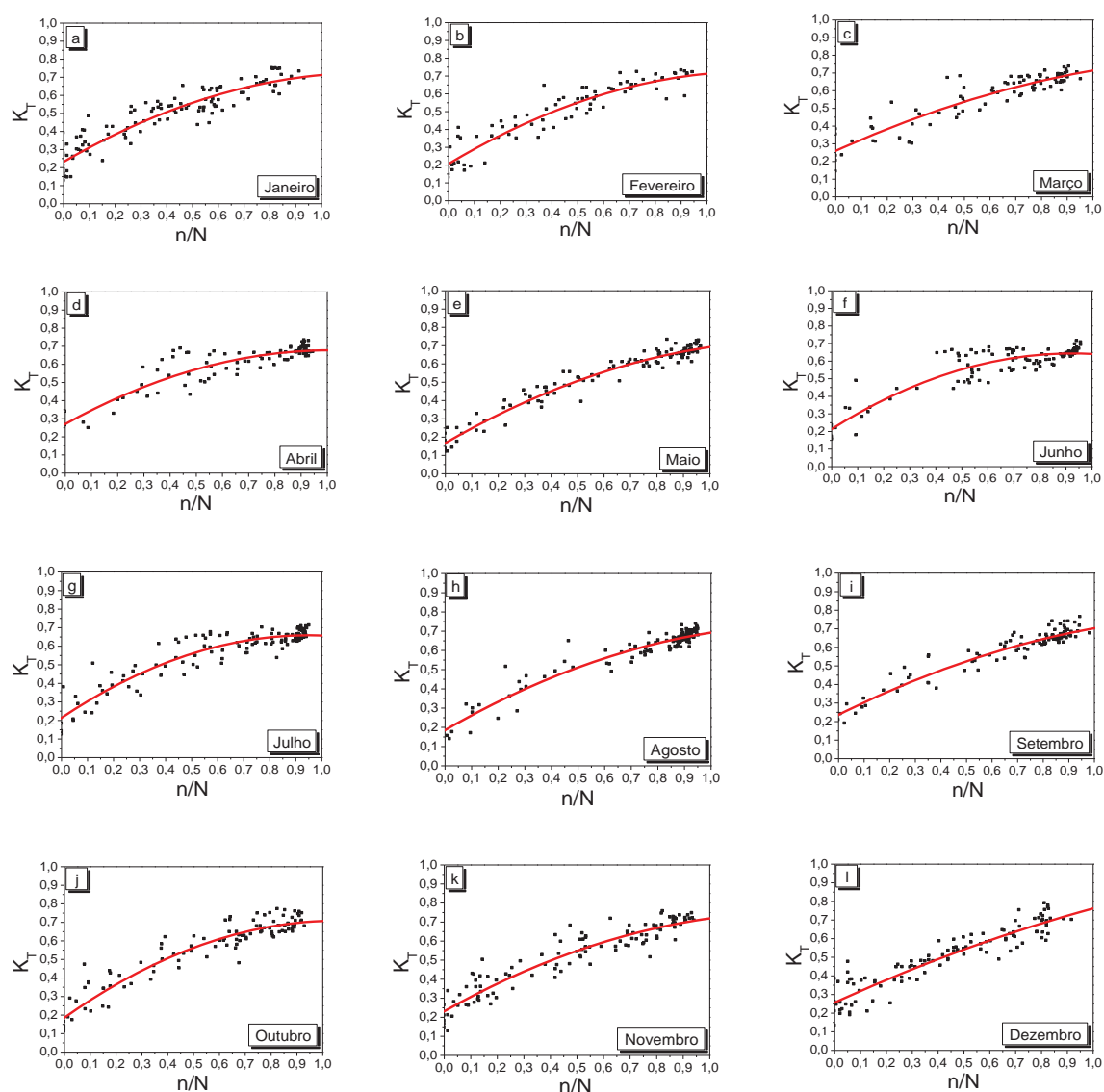


Figura 20. Correlação das frações K_T em função da razão de insolação (n/N) para agrupamento de dados mensais.

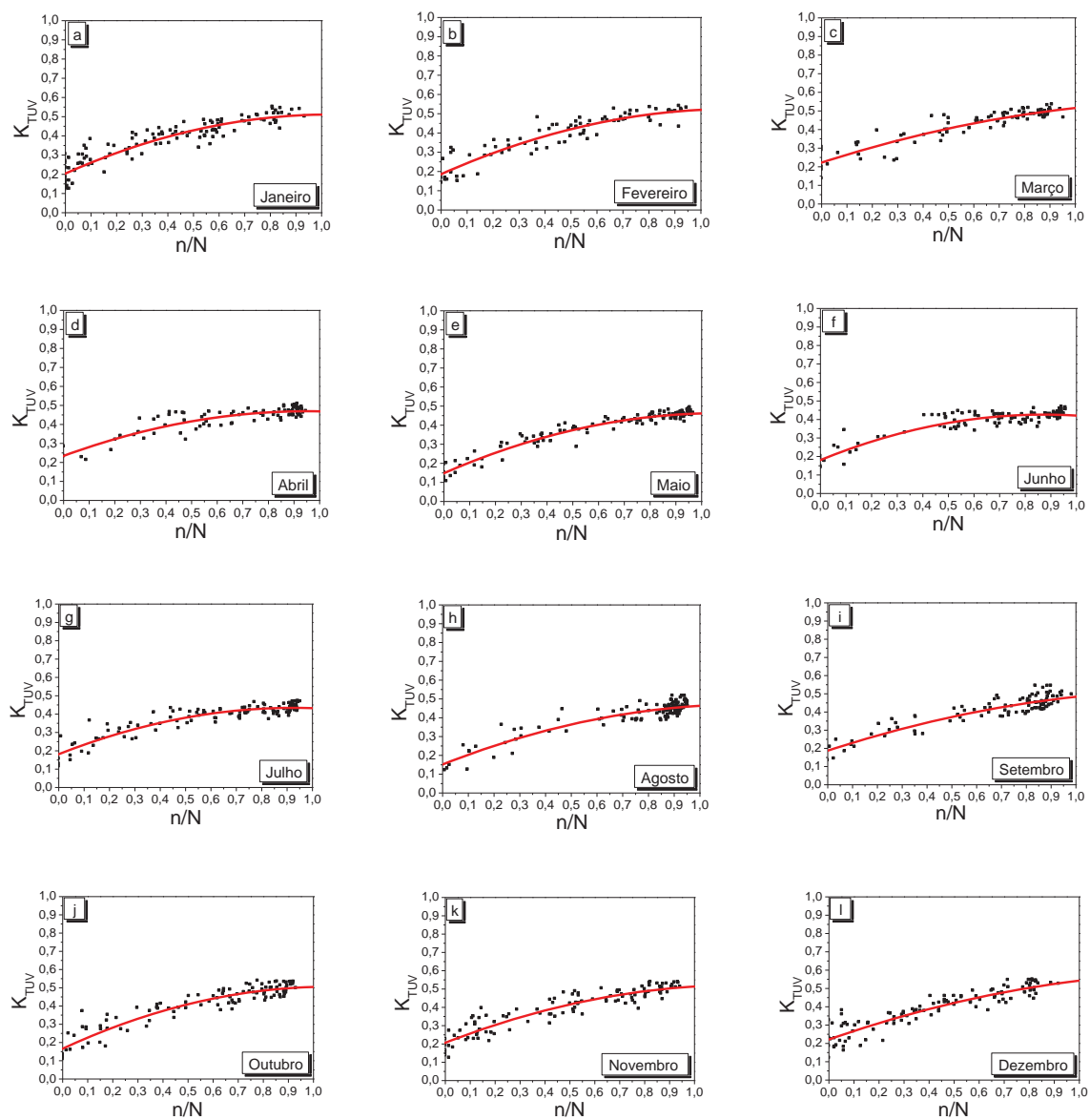


Figura 21. Correlação das frações K_{TUV} em função da razão de insolação (n/N) para agrupamento de dados mensais.

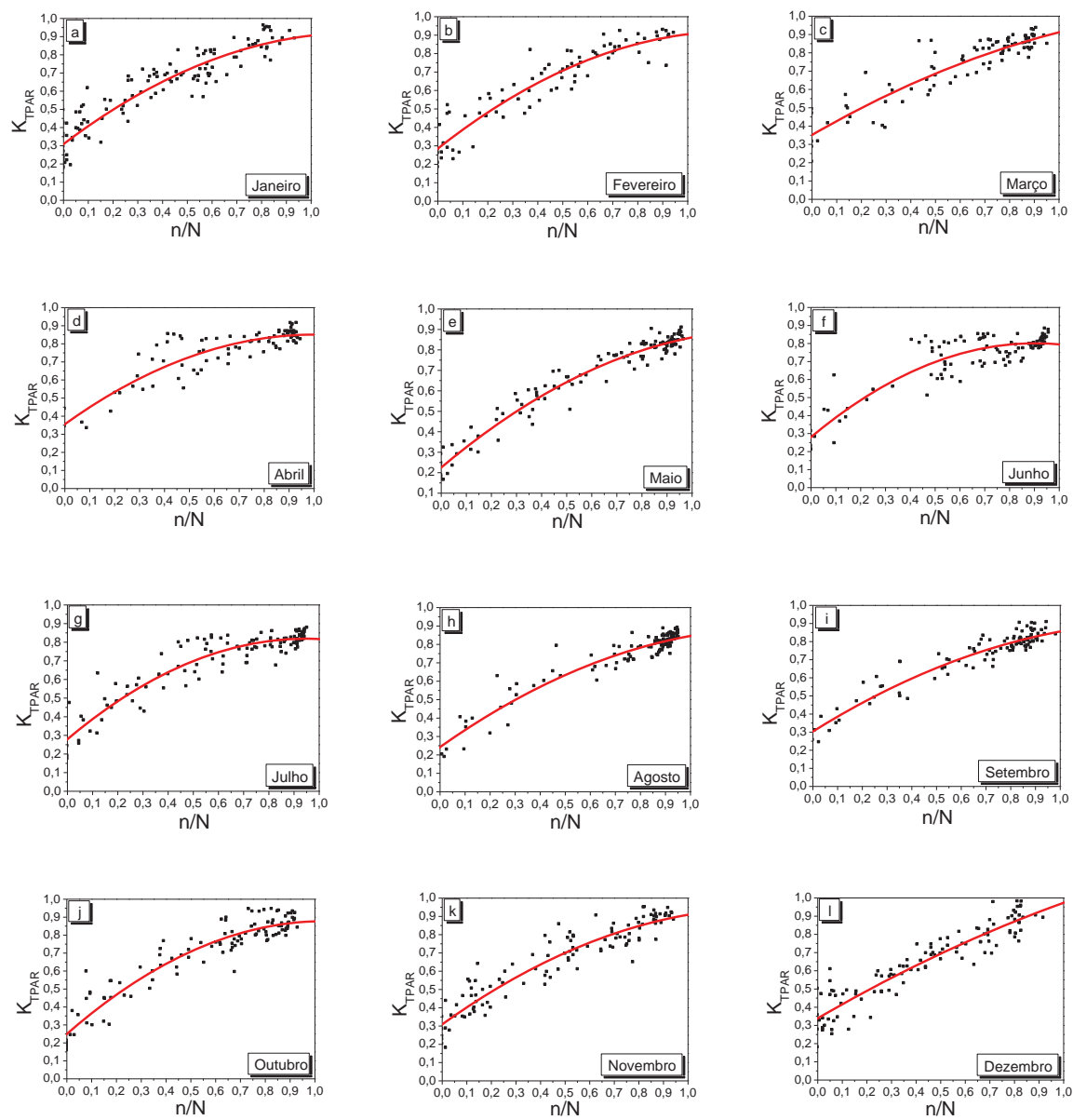


Figura 22. Correlação das frações K_{TPAP} em função da razão de insolação (n/N) para agrupamento de dados mensais.

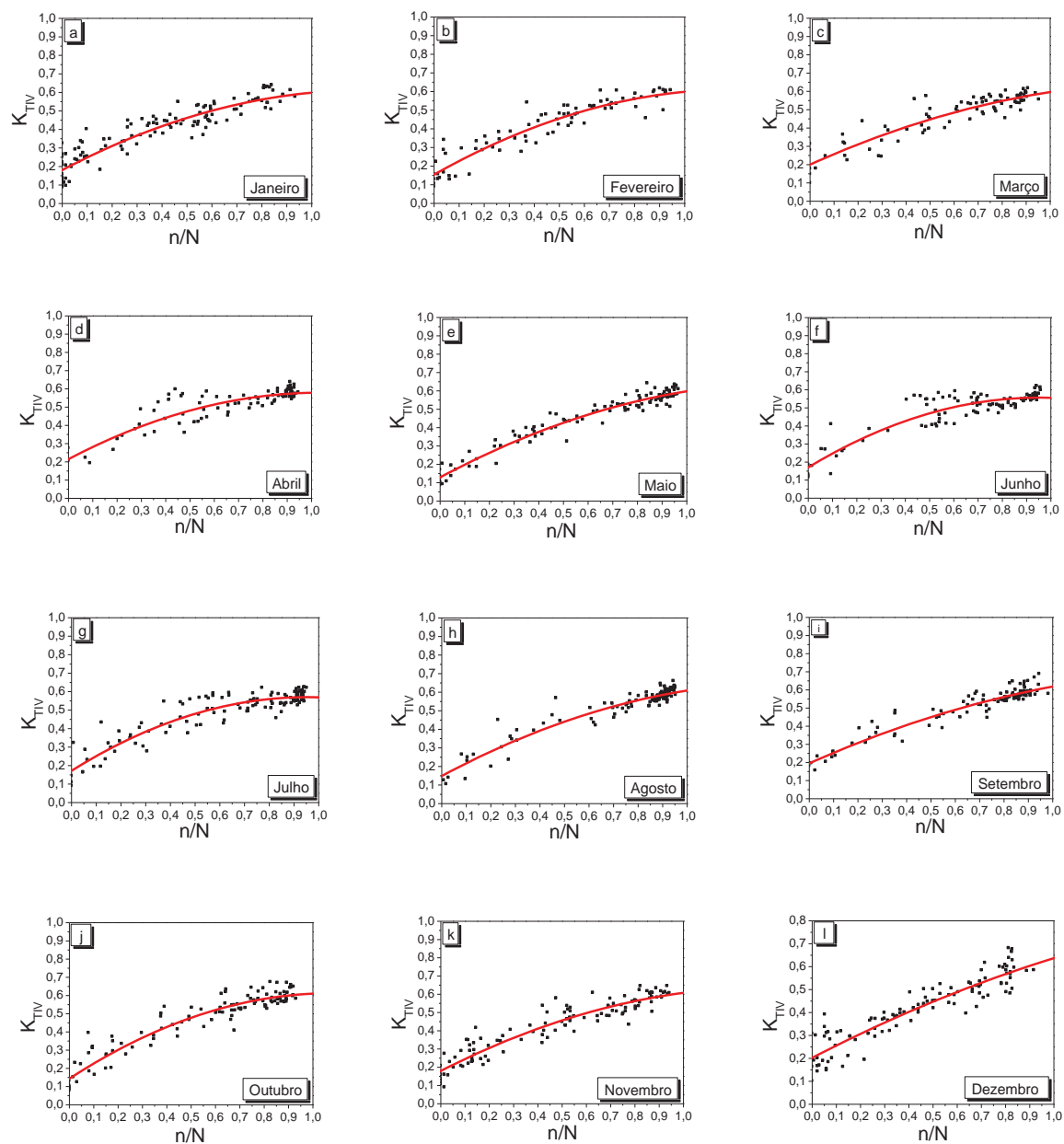


Figura 23. Correlação das frações K_{TIV} em função da razão de insolação (n/N) para agrupamento de dados mensais.

As equações parabólicas mensais obtidas para a radiação G , UV , PAR e IV estão apresentadas nas tabelas 13, 14, 15 e 16.

Tabela 13. Equações de estimativa parabólicas de 2º grau da radiação G mensal.

G	Equações Parabólicas de 2º Grau	R ²
Janeiro	$(K_T) = 0,232 + 0,828 (n/N) - 0,346 (n/N)^2$	0,870
Fevereiro	$(K_T) = 0,207 + 0,871 (n/N) - 0,365 (n/N)^2$	0,882
Março	$(K_T) = 0,260 + 0,655 (n/N) - 0,201 (n/N)^2$	0,847
Abril	$(K_T) = 0,270 + 0,801 (n/N) - 0,394 (n/N)^2$	0,798
Maio	$(K_T) = 0,168 + 0,834 (n/N) - 0,309 (n/N)^2$	0,956
Junho	$(K_T) = 0,214 + 0,930 (n/N) - 0,503 (n/N)^2$	0,841
Julho	$(K_T) = 0,214 + 0,937 (n/N) - 0,494 (n/N)^2$	0,859
Agosto	$(K_T) = 0,185 + 0,797 (n/N) - 0,290 (n/N)^2$	0,913
Setembro	$(K_T) = 0,237 + 0,687 (n/N) - 0,221 (n/N)^2$	0,906
Outubro	$(K_T) = 0,186 + 0,986 (n/N) - 0,464 (n/N)^2$	0,904
Novembro	$(K_T) = 0,232 + 0,781 (n/N) - 0,294 (n/N)^2$	0,888
Dezembro	$(K_T) = 0,257 + 0,781 (n/N) - 0,128 (n/N)^2$	0,864

Tabela 14. Equações de estimativa parabólicas de 2º grau da radiação UV mensal.

UV	Equações Parabólicas de 2º Grau	R ²
Janeiro	$(K_{TUV}) = 0,204 + 0,593 (n/N) - 0,286 (n/N)^2$	0,858
Fevereiro	$(K_{TUV}) = 0,186 + 0,601 (n/N) - 0,266 (n/N)^2$	0,863
Março	$(K_{TUV}) = 0,222 + 0,439 (n/N) - 0,145 (n/N)^2$	0,846
Abril	$(K_{TUV}) = 0,234 + 0,493 (n/N) - 0,258 (n/N)^2$	0,770
Maio	$(K_{TUV}) = 0,149 + 0,589 (n/N) - 0,276 (n/N)^2$	0,945
Junho	$(K_{TUV}) = 0,181 + 0,564 (n/N) - 0,323 (n/N)^2$	0,846
Julho	$(K_{TUV}) = 0,182 + 0,545 (n/N) - 0,294 (n/N)^2$	0,843
Agosto	$(K_{TUV}) = 0,152 + 0,539 (n/N) - 0,227 (n/N)^2$	0,843
Setembro	$(K_{TUV}) = 0,187 + 0,445 (n/N) - 0,148 (n/N)^2$	0,821
Outubro	$(K_{TUV}) = 0,166 + 0,636 (n/N) - 0,297 (n/N)^2$	0,885
Novembro	$(K_{TUV}) = 0,207 + 0,530 (n/N) - 0,223 (n/N)^2$	0,864
Dezembro	$(K_{TUV}) = 0,222 + 0,477 (n/N) - 0,155 (n/N)^2$	0,845

Tabela 15. Equações de estimativa parabólicas de 2º grau da radiação PAR mensal.

PAR	Equações Parabólicas de 2º Grau	R ²
Janeiro	$(K_{TPAR}) = 0,309 + 1,032 (n/N) - 0,435 (n/N)^2$	0,871
Fevereiro	$(K_{TPAR}) = 0,285 + 1,069 (n/N) - 0,449 (n/N)^2$	0,878
Março	$(K_{TPAR}) = 0,352 + 0,778 (n/N) - 0,218 (n/N)^2$	0,841
Abril	$(K_{TPAR}) = 0,355 + 0,989 (n/N) - 0,494 (n/N)^2$	0,797
Maió	$(K_{TPAR}) = 0,226 + 1,032 (n/N) - 0,396 (n/N)^2$	0,954
Junho	$(K_{TPAR}) = 0,281 + 1,153 (n/N) - 0,638 (n/N)^2$	0,826
Julho	$(K_{TPAR}) = 0,279 + 1,140 (n/N) - 0,602 (n/N)^2$	0,865
Agosto	$(K_{TPAR}) = 0,243 + 0,960 (n/N) - 0,357 (n/N)^2$	0,908
Setembro	$(K_{TPAR}) = 0,304 + 0,851 (n/N) - 0,299 (n/N)^2$	0,904
Outubro	$(K_{TPAR}) = 0,250 + 1,208 (n/N) - 0,581 (n/N)^2$	0,901
Novembro	$(K_{TPAR}) = 0,309 + 0,964 (n/N) - 0,364 (n/N)^2$	0,887
Dezembro	$(K_{TPAR}) = 0,339 + 0,785 (n/N) - 0,150 (n/N)^2$	0,869

Tabela 16. Equações de estimativa parabólicas de 2º grau da radiação IV mensal.

IV	Equações Parabólicas de 2º Grau	R ²
Janeiro	$(K_{TIV}) = 0,180 + 0,709 (n/N) - 0,291 (n/N)^2$	0,868
Fevereiro	$(K_{TIV}) = 0,154 + 0,761 (n/N) - 0,317 (n/N)^2$	0,884
Março	$(K_{TIV}) = 0,200 + 0,591 (n/N) - 0,195 (n/N)^2$	0,842
Abril	$(K_{TIV}) = 0,215 + 0,702 (n/N) - 0,338 (n/N)^2$	0,790
Maió	$(K_{TIV}) = 0,129 + 0,720 (n/N) - 0,251 (n/N)^2$	0,952
Junho	$(K_{TIV}) = 0,171 + 0,812 (n/N) - 0,427 (n/N)^2$	0,845
Julho	$(K_{TIV}) = 0,172 + 0,836 (n/N) - 0,439 (n/N)^2$	0,844
Agosto	$(K_{TIV}) = 0,149 + 0,709 (n/N) - 0,249 (n/N)^2$	0,911
Setembro	$(K_{TIV}) = 0,195 + 0,597 (n/N) - 0,174 (n/N)^2$	0,901
Outubro	$(K_{TIV}) = 0,144 + 0,870 (n/N) - 0,403 (n/N)^2$	0,902
Novembro	$(K_{TIV}) = 0,180 + 0,679 (n/N) - 0,251 (n/N)^2$	0,886
Dezembro	$(K_{TIV}) = 0,203 + 0,545 (n/N) - 0,110 (n/N)^2$	0,856

O coeficiente de determinação R² das equações parabólicas mensais da radiação G, na tabela 13, expressa uma significativa correlação estatística entre a transmissividade da radiação G e a razão de insolação (n/N) na atmosfera local. A comparação entre os coeficientes de determinação R² dos modelos apresenta que o ajuste foi ligeiramente melhor na seqüência dos meses: maio, agosto, setembro, outubro, novembro, fevereiro, janeiro, dezembro, julho, março, junho e abril. O maior valor foi no período do mês de maio onde o coeficiente de determinação foi de R² = 0,956 e o menor foi em abril com R² = 0,798.

A tabela 14 mostra o coeficiente de determinação R² das equações parabólicas mensais da radiação UV, onde expressa uma significativa correlação estatística entre a transmissividade da radiação UV e a razão de insolação (n/N) na atmosfera local. A

comparação entre os coeficientes de determinação R^2 dos modelos apresenta que o ajuste foi ligeiramente melhor na seqüência dos meses: maio, outubro, novembro, fevereiro, janeiro, março, junho, dezembro, agosto, julho, setembro e abril. O maior valor foi no período do mês de maio onde o coeficiente de determinação foi de $R^2 = 0,945$ e o menor foi em abril com $R^2 = 0,770$.

Em seqüência a tabela 15, mostra o coeficiente de determinação R^2 das equações parabólicas mensais da radiação PAR, onde expressa uma significativa correlação estatística entre a transmissividade da radiação PAR e a razão de insolação (n/N) na atmosfera local. A comparação entre os coeficientes de determinação R^2 dos modelos apresenta que o ajuste foi ligeiramente melhor na seqüência dos meses: maio, agosto, setembro, outubro, novembro, fevereiro, janeiro, dezembro, julho, março, junho e abril. O maior valor foi no período do mês de maio onde o coeficiente de determinação foi de $R^2 = 0,954$ e o menor foi em abril com $R^2 = 0,797$.

A tabela 16 mostra o coeficiente de determinação R^2 das equações parabólicas mensais da radiação IV, onde expressa uma significativa correlação estatística entre a transmissividade da radiação IV e a razão de insolação (n/N) na atmosfera local. A comparação entre os coeficientes de determinação R^2 dos modelos apresenta que o ajuste foi ligeiramente melhor na seqüência dos meses: maio, agosto, outubro, setembro, novembro, fevereiro, janeiro, dezembro, junho, julho, março e abril. O maior valor foi no período do mês de maio onde o coeficiente de determinação foi de $R^2 = 0,952$ e o menor foi em abril com $R^2 = 0,790$.

Nas tabelas 17, 18, 18 e 20, os indicativos estatísticos apresentam bons resultados gerados no período mensal das radiações G, UV, PAR e IV.

Tabela 17. Validação das equações parabólicas mensais da radiação G aplicadas nos meses de 2005.

G	MBE (MJ m ⁻²)	RMSE (MJ m ⁻²)	MBE (%)	RMSE (%)	d
Janeiro	0,708	2,058	4,283	12,440	0,978
Fevereiro	0,699	1,930	3,072	8,481	0,957
Março	0,548	1,875	2,992	10,241	0,973
Abril	1,184	1,687	6,915	9,849	0,957
Mai	0,450	0,988	3,195	7,007	0,989
Junho	0,349	1,238	2,735	9,699	0,962
Julho	0,044	1,590	0,306	11,163	0,917
Agosto	0,665	0,931	3,794	5,316	0,930
Setembro	0,331	1,021	1,925	5,934	0,990
Outubro	0,831	2,574	4,794	14,846	0,930
Novembro	0,704	1,609	3,368	7,702	0,979
Dezembro	2,023	3,250	11,810	18,974	0,931

Tabela 18. Validação das equações parabólicas mensais da radiação UV aplicadas nos meses de 2005.

UV	MBE (MJ m ⁻²)	RMSE (MJ m ⁻²)	MBE (%)	RMSE (%)	d
Janeiro	0,014	0,086	1,893	11,312	0,974
Fevereiro	0,049	0,085	5,183	8,905	0,940
Março	0,038	0,077	4,935	9,930	0,966
Abril	0,057	0,076	8,332	11,049	0,931
Mai	0,041	0,054	7,610	10,042	0,971
Junho	0,027	0,048	5,588	10,031	0,943
Julho	0,025	0,057	4,804	10,977	0,891
Agosto	0,083	0,087	13,379	14,024	0,658
Setembro	0,048	0,073	7,322	11,007	0,958
Outubro	0,060	0,128	8,386	18,008	0,872
Novembro	0,059	0,082	6,768	9,372	0,959
Dezembro	0,110	0,151	14,622	20,225	0,898

Tabela 19. Validação das equações parabólicas mensais da radiação PAR aplicadas nos meses de 2005.

PAR	MBE (MJ m ⁻²)	RMSE (MJ m ⁻²)	MBE (%)	RMSE (%)	d
Janeiro	0,170	1,021	2,008	12,043	0,977
Fevereiro	0,245	0,914	2,153	8,027	0,958
Março	0,218	0,920	2,378	10,028	0,972
Abril	0,438	0,733	5,137	8,589	0,965
Mai	0,193	0,458	2,800	6,646	0,989
Junho	0,109	0,590	1,743	9,417	0,961
Julho	-0,034	0,759	-0,497	10,932	0,915
Agosto	0,270	0,434	3,231	5,181	0,930
Setembro	0,038	0,530	0,455	6,315	0,987
Outubro	0,208	1,169	2,387	13,436	0,936
Novembro	0,055	0,752	0,513	7,075	0,981
Dezembro	0,662	1,435	7,439	16,120	0,945

Tabela 20. Validação das equações parabólicas mensais da radiação IV aplicadas nos meses de 2005.

IV	MBE (MJ m ⁻²)	RMSE (MJ m ⁻²)	MBE (%)	RMSE (%)	d
Janeiro	0,524	1,026	7,176	14,058	0,976
Fevereiro	0,405	0,969	3,885	9,292	0,954
Março	0,292	0,901	3,485	10,762	0,974
Abril	0,689	0,902	8,710	11,412	0,948
Mai	0,216	0,500	3,243	7,503	0,988
Junho	0,213	0,617	3,540	10,258	0,962
Julho	0,053	0,791	0,783	11,676	0,917
Agosto	0,311	0,440	3,644	5,165	0,938
Setembro	0,245	0,491	3,003	6,023	0,990
Outubro	0,580	1,327	7,317	16,750	0,923
Novembro	0,590	0,900	6,290	9,589	0,972
Dezembro	1,251	1,739	16,733	23,265	0,911

O indicativo MBE da tabela 17, mostra por meio do sinal positivo, que a estimativa da radiação G superestima a medida nos meses. Portanto, o melhor desempenho dos meses foi na seqüência: julho, setembro, junho, março, fevereiro, maio, novembro, agosto, janeiro, outubro, abril e dezembro. Nas estimativas mensais, a radiação G superestima a medida em 0,3% para o mês de julho, setembro em 2,0%, junho em 2,8%, março em 3,0%, fevereiro em 3,1%, maio em 3,2%, novembro em 3,3%, agosto em 3,8%, janeiro em 4,3%, outubro em 4,8%, abril em 7,0% e para dezembro em 11,8%, respectivamente. Os valores

inferiores a $\pm 12,0\%$ foram significativos estatisticamente, pois são da MBE é da ordem de grandeza do erro experimental.

Na tabela 18, o indicativo MBE mostra por meio do sinal positivo, que a estimativa da radiação UV superestima a medida nos meses. Portanto, o melhor desempenho dos meses foi na seqüência: janeiro, julho, março, fevereiro, junho, novembro, setembro, maio, abril, outubro, agosto e dezembro. Nas estimativas mensais, a radiação UV superestima a medida em 1,9% para o mês de janeiro, julho em 4,8%, março em 5,0%, fevereiro em 5,2%, junho em 5,6%, novembro em 6,8%, setembro em 7,3%, maio em 7,6%, abril em 8,3%, outubro em 8,4%, agosto em 13,4% e para dezembro em 14,6%, respectivamente. Os valores inferiores a $\pm 15,0\%$ foram significativos estatisticamente, pois são da MBE é da ordem de grandeza do erro experimental.

Na tabela 19, o indicativo MBE mostra por meio do sinal positivo e negativo, que a estimativa da radiação PAR superestima medida nos meses e subestima somente no mês de julho. Portanto, o melhor desempenho dos meses foi na seqüência: julho, setembro, novembro, junho, janeiro, fevereiro, março, outubro, maio, agosto, abril e dezembro. Nas estimativas mensais, a radiação PAR subestima a medida em -0,5% para o mês de julho, superestima para os meses de setembro em 0,5%, novembro em 5,0%, junho em 1,7%, janeiro em 2,0%, fevereiro em 2,2%, março em 2,4%, outubro em 2,4%, maio em 2,8%, agosto em 3,2%, abril em 5,1% e para dezembro em 7,4%, respectivamente. Os valores inferiores a $\pm 8,0\%$ foram significativos estatisticamente, pois são da MBE é da ordem de grandeza do erro experimental.

O indicativo MBE na tabela 20 mostra por meio do sinal positivo, que a estimativa da radiação IV superestima a medida nos meses. Portanto, o melhor desempenho dos meses foi na seqüência: julho, setembro, maio, março, junho, agosto, fevereiro, novembro, janeiro, outubro, abril e dezembro. Nas estimativas mensais, a radiação IV superestima a medida em 0,7% para o mês de julho, setembro em 3,0%, maio em 3,2%, março em 3,5%, junho em 3,5%, agosto em 3,6%, fevereiro em 3,9%, novembro em 6,3%, janeiro em 7,2%, outubro em 7,3%, abril em 8,7% e para dezembro em 16,7%, respectivamente. Os valores inferiores a $\pm 17,0\%$ foram significativos estatisticamente, pois são da MBE é da ordem de grandeza do erro experimental.

O indicativo estatístico RMSE visto nas tabelas 23, 24, 25 e 26 variou até um valor máximo de 19,0% para G, 20,2% para UV, 16,1% para PAR e 23,2% para IV no mês de dezembro. Entre os meses as radiações G, UV, PAR e IV os RMSE foram aproximadamente iguais com pequena vantagem no desempenho para a radiação G em seqüência: agosto (5,3%), setembro (6,0%), maio (7,0%), novembro (7,7%), fevereiro (8,5%), junho (9,7%), abril (9,8%), março (10,2%), julho (11,1%), janeiro (12,4%), outubro (14,8%) e dezembro (19,0%).

Para a radiação UV o desempenho foi na ordem de: fevereiro (8,9%), novembro (9,4%), março (9,9%), junho (10,0%), maio (10,0%), julho (11,0%), setembro (11,0%), abril (11,0%), janeiro (11,3%), agosto (14,0%), outubro (18,0%) e dezembro (20,2%).

O desempenho para a radiação PAR foi na ordem de: agosto (5,2%), setembro (6,3%), maio (6,6%), novembro (7,1%), fevereiro (8,0%), abril (8,6%), junho (9,4%), março (10,2%), julho (11,0%), janeiro (12,0%), outubro (13,4%) e dezembro (16,1%).

Na radiação IV o desempenho foi na ordem de: agosto (5,2%), setembro (6,0%), maio (7,5%), fevereiro (9,3%), novembro (9,6%), junho (10,3%), março (10,8%), abril (11,4%), julho (11,7%), janeiro (14,0%), outubro (16,7%) e dezembro (23,2%).

Os resultados obtidos para os espalhamentos das radiações foram considerados estatisticamente significativo. Os coeficiente “d” de Willmott superior a 0,917 para radiação G, 0,658 para a UV, 0,915 para a PAR e 0,911 para IV mostram bom nível de ajustamento da estimativa das radiações G, UV, PAR e IV em relação à medida no período mensal. A figura 24 mostra graficamente os resultados estatísticos obtidos nas validações no período mensal para a radiação G, UV, PAR e IV.

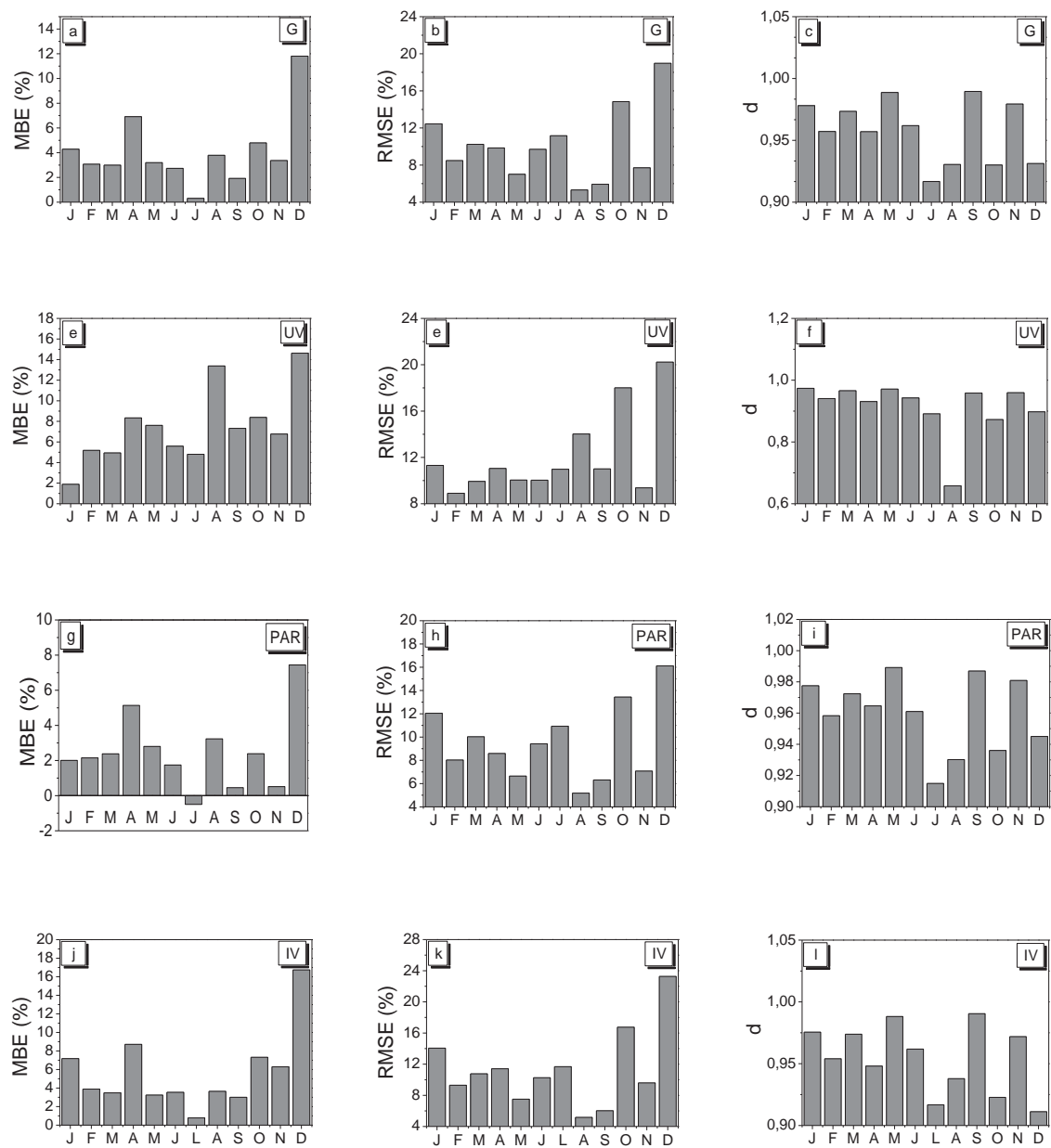


Figura 24. Índices estatísticos MBE, RMSE e “d” de ajustamento G, UV, PAR e IV, gerados na validação dos meses de 2005.

5 CONCLUSÕES

Existe uma correlação entre a transmissividade atmosférica das radiações global (K_T), ultravioleta (K_{TUV}), fotossinteticamente ativa (K_{TPAR}) e infravermelha próxima (K_{TIV}) diárias, e a razão de insolação (n/N) em Botucatu. A transmissividade das radiações foram mais elevadas na condição atmosférica de maior valor da razão de insolação onde as concentrações de nuvens e vapor d'água na atmosfera são menores no ano, e ao contrário, é menos elevada na condição atmosférica de menor valor da razão de insolação onde as concentrações de nuvens e vapor d'água na atmosfera são maiores e a concentração de aerossóis é menor no ano.

A transmissividade atmosférica das radiações foi maior para a radiação PAR, decrescendo em seqüência para as radiações G, IV e UV. A transmissividade da fração de K_T variou de 47,1% em janeiro a 60,4% em abril; a fração K_{TUV} variou de 3,66% em janeiro a 4,13% em setembro; K_{TPAR} variou de 60,7% em janeiro a 76,3% em abril, e a fração K_{TIV} variou de 38,8% a 75,1% em agosto. A razão de insolação variou de 38,8% em janeiro a 75,0% em agosto.

As relações das frações K_T , K_{TUV} , K_{TPAR} e K_{TIV} em função da razão de insolação (n/N) para agrupamentos total dos dados diários (anual) se ajustaram a dois tipos de equações de regressão: linear do tipo $Y = a + bX$, e a parabólica de segundo grau tipo $Y = a + bX + cX^2$ com elevados coeficientes de correlações. Para o modelo linear e parabólico o valor de R^2 foi melhor na seqüência para as radiações IV, G, PAR e UV.

Na validação do modelo linear e parabólico os resultados da validação mostraram as estimativas radiações G, PAR e IV se ajustaram estatisticamente os indicadores estatísticos MBE, RMSE e “d”. Para a radiação UV, o ajuste foi menos significativo, pelo uso da medida da radiação UV do ano de 2005, na qual foi inferior a medida média do período 2001 a 2004.

Existe uma correlação sazonal (estações do ano) entre a transmissividade atmosférica K_T , K_{TUV} , K_{TPAR} e K_{TIV} diárias, e a razão de insolação (n/N) diárias em Botucatu. Para a radiação G, os resultados foram melhores na seqüência: outono, primavera, verão e inverno; a UV, verão, outono, primavera e inverno; PAR, outono, verão, primavera e inverno, e IV outono, primavera, verão e inverno.

Existe uma correlação mensal entre a transmissividade atmosférica das radiações K_T , K_{TUV} , K_{TPAR} e K_{TIV} diárias, e a razão de insolação (n/N) em Botucatu. Para a radiação G, os resultados foram melhores na seqüência: maio, agosto, setembro, outubro, novembro, fevereiro, janeiro, dezembro, julho, março, junho e abril; UV, maio, outubro, novembro, fevereiro, janeiro, março, junho, dezembro, agosto, julho, setembro e abril a PAR, maio, agosto, setembro, outubro, novembro, fevereiro, janeiro, dezembro, julho, março, junho e abril e a IV, maio, agosto, outubro, setembro, novembro, fevereiro, janeiro, dezembro, junho, julho, março e abril.

Na validação do modelo parabólico sazonal e mensal, os resultados obtidos para os indicadores estatísticos MBE e RMSE, e o coeficiente “d” de Willmott mostraram bom nível de ajustamento da estimativa das radiações G, UV, PAR e IV em relação à medida.

O ajuste foi ligeiramente melhor para o modelo parabólico em relação ao modelo linear em todas as radiações G, UV, PAR e IV. A escolha da aplicação do modelo (linear e parabólico) fica a critério do pesquisador.

O modelo de estimativa linear e parabólico pode ser utilizado com precisão e exatidão para aplicações agrárias, biológicas e etc.

Agradecimentos: Ao CNPq pelo apoio financeiro.

6 REFERÊNCIAS

- AGUIAR, J. V. et al. Estimativa da radiação solar a partir da insolação, na região metropolitana de Fortaleza, CE. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 11., 1999, Florianópolis. **Anais...** Sete Lagoas: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 1999. 1 CD-ROM.
- AKINOGLU, B. G.; ECEVIT, A. Construction of a quadratic model using modified Angström coefficients to estimate global solar radiation. **Solar Energy**, Phoenix, v. 45, n. 2, p. 85-92, 1990.
- AL-ARUDI, S. D. The empirical relationship between global radiation and global ultraviolet (290-385 nm) solar radiation component. **Solar Energy**, Phoenix, v. 45, n. 61-64, p. 61, 1990.
- AL-ARURI, S. et al. Anassessment of global ultraviolet radiation in the range (0.290–0.385 μm) in Kuwait. **Solar Energy**, Phoenix, v. 41, p. 159-162, 1988.
- ALADOS-ARBOLEDAS, L. et al. Parametric models to estimate photosynthetically active radiation in Spain. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 101, p. 187-201, 2000.
- ALMOROX, J.; HONTORIA, C. Global solar radiation estimation using sunshine duration in Spain. **Energy Conversion and Management**, Amsterdam, v. 45, p. 1529-1535, 2004.

ALVALÁ, R. C. D. S.; SILVA, F. W. C. Relação entre a radiação fotossinteticamente ativa e irradiância de onda curta em área de policultivo na Amazônia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 11., 2000, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2000. p. 2453-2462.

ALVES, A. R. et al. Estimativa da radiação solar global diária a partir de dados de insolação, para Viçosa, Minas Gerais. **Experientiae**, Viçosa, MG, v. 27, n. 10, p. 211-222, 1981.

AMPRATWUM, D. B.; DORVLO, A. S. S. Estimation of solar radiation from the number of sunshine hours. **Applied Energy**, Oxford, v. 63, p. 161-167, 1999.

ANDRADY, A. L. et al. Effects of increased solar ultraviolet radiation on materials. **Journal of Photochemistry and Photobiology B: biology**, Lausanne, v. 46, p. 96-103, 1998.

ASSUNÇÃO, H. F. **Modelo paramétrico para estimativa da radiação solar ultravioleta**. 2003. 147 f. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura)-Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2003.

AZEVEDO, P. V.; VAREJÃO-SILVA, M. A.; VARGAS, G. A. O. **Zoneamento do potencial de energia solar no nordeste**. Campina Grande: UFPB/NMA, 1981. 80 p.

BAKIRCI, K. Correlations for estimation of daily global solar radiation with hours of bright sunshine in Turkey. **Energy**, Oxford, v. 34, p. 485-501, 2009.

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

BLATCHLEY III, E. R. et al. Validation of large-scale, monochromatic UV disinfection systems for drinking water using dyed microspheres. **Water Research**, London, v. 42, n. 3, p. 677-688, 2008.

BOLSENGA, S. J. Near infrared radiation in northern greenland. **Journal of Applied Meteorology**, Lawrence, v. 6, p. 449-451, 1967.

CANÃADA, J.; PEDRÓS, G.; BOSCA, J. V. Relationship between UV (290-385 nm) and broadband solar radiation hourly values in Valencia and Córdoba, Spain. **Energy**, Oxford, v. 28, p. 199-217, 2003.

CARVALHO, L. M. V.; JONES, C.; LIEBMANN, B. Extreme precipitation events in southeastern South America and large-scale convective patterns in the South Atlantic Convergence Zone. **Journal of Climate**, Lawrence, v. 15, p. 2377-2394, 2002.

CEBALLOS, J. C. et al. Desempenho de heliógrafos e actinógrafos na estimativa de insolação e fluxo direcional. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 7, p. 563-581, 1992.

CERVELLINI, A.; SALATI, E.; GODOY, H. Estimativa da distribuição de energia solar no estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v. 25, n. 3, p. 31-40, 1966.

CODATO, G. et al. Global and diffuse solar irradiances in urban and rural areas in Southeast Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, Vienna, v. 93, n. 01, p. 57-73, 2008.

COULSON, K. L. **Solar and terrestrial radiation, methods and measurements**. New York: Academic Press, 1973. 322 p.

DAL PAI, A. **Anisotropia da irradiância solar difusa medida pelo método de sombreamento Melo-Escobedo: fatores de correção anisotrópicos e modelos de estimativa**. 2005. 87 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura)-Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2005.

DAL PAI, E. **Radiações e frações solares UV, PAR e IV em estufas de polietileno: evolução anual média mensal diária e equação de estimativa**. 2010. 69 f. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura)-Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2010.

ESCOBEDO, J. F. et al. Modeling hourly and daily fractions of UV, PAR and NIR to global solar radiation under various sky conditions at Botucatu, Brazil. **Applied Energy**, Oxford, v. 86, n. 3, p. 299-309, 2009.

FERREIRA, N. J.; SANCHES, M.; SILVA DIAS, F. A. F. Composição da Zona de Convergência do Atlântico Sul em períodos de EL Niño e La Niña. **Revista Brasileira de Meteorologia**, Rio de Janeiro, v. 19, p. 89-98, 2004.

FINCH, D. A. et al. Photosynthetically active radiation regimes in a southern African savanna environment. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 122, p. 229-238, 2004.

FONTANA, D. C.; OLIVEIRA, D. Relação entre radiação solar global e insolação para o estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 4, n. 1, p. 87-91, 1996.

FOYO-MORENO, I.; VIDA, J.; ALADOS-ARBOLEDAS, L. A simple all weather model to estimate ultraviolet solar radiation (290-385 nm). **Journal of Applied Meteorology**, Lawrence, v. 38, p. 1021-1026, 1999.

FRISINA, V. A. **Modelagem das radiações global, difusa e fotossinteticamente ativa em ambiente protegido e suas relações com o crescimento e produtividade da cultura de pimentão (*capsicum annuum* L.)**. 2002. 157 f. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura)-Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2002.

GALVANI, E.; ESCOBEDO, J. F. Relação entre radiação solar global e radiação fotossinteticamente ativa e a produtividade da cultura de pepino em meio natural e protegido. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 11., 2000, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: SBM, 2000. p. 7-10.

GIES, P. H. Protection against solar ultraviolet radiation. **Mutation Research**, Amsterdam, v. 422, p. 15-22, 1998.

GOMES, E. N. **Medida e modelos da radiação fotossinteticamente ativa global, direta na incidência horizontal**. 2002. 113 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura)-Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2002.

HAO, X. et al. Effects of pre-exposure to ultraviolet-B radiation on responses of tomato (*Lycopersicon esculentum* cv. New Yorker) to ozone in ambient and elevated carbon dioxide. **Environmental Pollution**, Oxford, v. 110, p. 217-224, 2000.

HEMMING, S. et al. Greenhouse Cooling by NIR-reflection. **Acta Horticulturae**, Leuven, v. 719, p. 97-106, 2006.

IQBAL, M. **An introduction to solar radiation**. Canada: Academic Press, 1983. 53 p.

JACOVIDES, C. P. et al. Ratio of PAR to broadband solar radiation measured in Cyprus. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 121, p. 135-140, 2004.

JACOVIDES, C. P. et al. Solar global UV (280-380 nm) radiation and its relationship with solar global radiation measured on the island of Cyprus. **Energy**, Oxford, v. 31, p. 2728-2738, 2006.

JACOVIDES, C. P. et al. The dependence of global and diffuse PAR radiation components on sky conditions at Athens, Greece. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 143, p. 277-287, 2007.

JIMÉNEZ, A. E. et al. Photocatalytic degradation of DBSN a using solar energy. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, Amsterdam, v. 60, p. 85-95, 2000.

KIRCHHOFF, V. W.; SILVA, A.; PINHEIRO, K. Wavelength dependence of aerosol optical thickness in the UV-B band. **Geophysical Research Letters**, Washington, DC, v. 29 n. 12, p. 1620, 2002.

KYLLING, A.; DAHLBACK, A.; MAYER, B. The effect of clouds and surface albedo on UV irradiances at a high latitude site. **Geophysical Research Letters**, Washington, DC, v. 27, p. 1411-1414, 2000.

LEMOS, C.; TOTA, J. Reanálise das linhas de correntes nos níveis de 1000hPa, 850hPa, 500 hPa e 150hPa sobre a América do Sul, no período entre 1979 e 1995. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 11., 2000, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: SBMET, 2000. p. 672-679.

LIEBMANN, B. et al. Submonthly convective variability over South America and the South Atlantic Convergence Zone. **Journal of Climate**, Lawrence, v. 12, p. 1877-1891, 1999.

LIN, W.; LU, E. Correlations between monthly average global solar radiation on horizontal surfaces and relative duration of sunshine in Yunnan Province, China. **Renewable Energy**, Oxford, v. 16, n. 3, p. 335-362, 1998.

LIU, X. et al. Calibration of Angström-Prescott coefficients (a, b) under different time scales and their impacts in estimating global solar radiation in the Yellow River basin. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 149, p. 697-710, 2009.

LUCCINI, E.; CEDE, A.; PIACENTINI, R. D. Effect of clouds on UV and total irradiance at Paradise Bay, Antarctic Peninsula, from a summer 2000 campaign. **Theoretical Applied Climatology**, Vienna, 75, p. 105-116, 2003.

LUDLAM, F. H. **Clouds and storms**. Pennsylvania: Pennsylvania State University Press, 1980. 405 p.

MARTÍNEZ-LOZANO, J. A.; CASANOVAS, A. J.; UTRILLAS, M. P. Comparison of global UV (290-385nm) and global irradiation measured during the warm season in València, Spain. **International Journal of Climatology**, West Sussex, v. 14, p. 93-102, 1994.

MARTÍNEZ-LOZANO, J. A. et al. The historic evolution of the Angström formula and its modifications: review and bibliography. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 33, p. 109-128, 1984.

MCCREE, K. J. Test of current definitions of photosynthetically active radiation against leaf photosynthesis data. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 10, p. 443-453, 1972.

NOGUÉS-PAEGLE, J.; MO, K. C. Alternating wet and dry conditions over South America during summer. **Monthly Weather Review**, Boston, v. 125, p. 279-291, 1997.

OGUNJOBI, K. O.; KIM, Y. J. Ultraviolet (280-400nm) and broadband solar hourly radiation at Kwangju, South Korea: analysis of their correlation with aerosol optical depth and clearness index. **Atmospheric Research**, Amsterdam, v. 71, p. 193-214, 2004.

OMETTO, A. **Estudo das relações entre radiação solar global, radiação líquida e insolação**. 1968. 64 f. Tese (Doutorado em Agronomia)-Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1968.

OMETTO, J. C. **Bioclimatologia vegetal**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1981. 413 p.

PAPAIOANNOU, G. et al. Photosynthetically active radiation in Athens. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 81, p. 287-298, 1996.

POWER, H. C. Estimating clear-sky beam irradiation from sunshine duration. **Solar Energy**, Phoenix, v. 71, n. 4, p. 217-224, 2001.

RIBEIRO, A. M. A. **Estudo das relações entre radiação global (Q_g) e razão de insolação (n/N), em algumas regiões do Brasil**. 1980. 88 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia)-Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1980.

ROBAA, S. M. A study of ultraviolet solar radiation at Cairo urban area, Egypt. **Solar Energy**, Oxford, v. 77, p. 251-259, 2004.

ROHDE R. A. Espectro solar. Berkeley. Disponível em:
<http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Image:Solar_Spectrum.png&redirect=no&oldid=137135398>. Acesso em: 20 out. 2011.

ROY, S. et al. Effects of *Yariv henylglycoside* on cell wall assembly in the lily pollen tube. **Planta**, Berlin, v. 193, p. 542-550, 1998.

SATYAMURTY P.; MATTOS L. F. Climatological lower tropospheric frontogenesis in the midlatitudes due to horizontal deformation and divergence. **Monthly Weather Review**, Boston, v. 117, p. 1355-1364, 1989.

SATYAMURTY, P. et al. Tropics: South America. In: _____. **Meteorology of the southern hemisphere**. Boston: American Meteorological Society, 1998. p. 119-139.

SPENCER, J. W. Fourier series representation of the position of the sun. **Search**, Wattleree, v. 2, p.172, 1971.

SPIEGEL, M. R.; STEPHENS, L. J. **Estatística**. Porto Alegre: Bookman, 2009. 595 p.

SOUZA, A. P. **Evoluções, frações e estimativas das irradiações global, direta e difusa em superfícies inclinadas**. 2009. 130 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Irrigação e Drenagem)-Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2009.

STIGTER, C. J.; MUSABILHA, M. M. The conservative ratio of photosynthetically active radiation to total radiation in the tropics. **Journal Applied Ecology**, Oxford, v. 19, p. 853-858, 1982.

STONE, R. J. Improved statistical procedure for evaluation of solar radiation estimation models. **Solar Energy**, Phoenix, v. 51, p. 289-91, 1993.

SUPIT, I.; VAN KAPPEL, R. R. A simple method to estimate global radiation. **Solar Energy**, Phoenix, v. 63, n. 3, p. 147-160, 1998.

TIBA, C.; FRAIDENRAICH, N. Analysis of monthly time series of radiation and sunshine hours in tropical climates. **Renewable Energy**, Oxford, v. 29, p. 1147-1160, 2004.

TIBA, C.; AGUIAR, R.; FRAIDENRAICH, N. Analysis of new relationship between monthly global irradiation and sunshine hours from a database of Brazil. **Renewable Energy**, Oxford, v. 30, p. 957-966, 2005.

UDO, S. O.; ARO, T. O. Global PAR related to global solar radiation for central Nigeria. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 97 p. 21-31, 1999.

VOGELMANN, A. M. et al. Observational constraints on non-Lorentzian continuum effects in the near-infrared solar spectrum using ARM ARESE data. **Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer**, New York, v. 60, n. 2, p. 231-246, 1998.

WILLMOTT, C. J. On the validation of models. **Physical Geography**, Columbia, v. 2, p. 184-194, 1981.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **Guide to meteorological instruments and methods of observation**. Geneva: WMO, 2006, v. 8. p. 162-170.

ZHANG, X.; ZHANG, Y.; ZHOUB, Y. Measuring and modelling photosynthetically active radiation in Tibet Plateau during april-octuber. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 102, p. 207-212, 2000.