

EQUAÇÕES DE ESTIMATIVAS SAZONAIS PARA AS RADIAÇÕES GLOBAL, DIFUSA E DIRETA INFRAVERMELHA EM BOTUCATU/SP/BRASIL.

T. J. Rossi¹, J. F. Escobedo²; C. M. dos Santos², Silva.M.B.P² e E. N. Gomes³

¹ Graduando em Ciências biológicas, IB-UNESP

Tel. +55143811-7162 e-mail: taizarossi@fca.unesp.br

² Departamento de Engenharia Rural – FCA/UNESP – Botucatu/SP/Brasil

³ Unesp Campus Experimental de Registro/SP/Brasil

Recibido 09/09/15, aceptado 09/10/15

RESUMO: É descrito no trabalho a obtenção das equações para estimativas sazonais das radiações infravermelho global (H_{GIV}^d), difusa (H_{dIV}^d) e direta (H_{dDIV}^d) em função das radiações global (H_G^d), difusa (H_d^d) e direta (H_D^d) do espectro total, respectivamente. A base de dados das radiações foi medida no período de 2003 a 2006 em Botucatu/SP/Brasil. As radiações dos espectros total e IV foram correlacionadas aos pares por meio de regressão linear do tipo ($Y = a X$) e os coeficientes de determinação, próximos dos 100%, mostram que as radiações H_{GIV}^d , H_{dIV}^d e H_{dDIV}^d estão bem correlacionadas sazonalmente com as radiações H_G^d , H_d^d e H_D^d respectivamente. Em relação à fração anual $K_{GIV} = (H_{GIV}^d / H_G^d) = 46,1\%$, a fração sazonal K_{GIV} é menor nas estações mais nebulosas e úmidas, verão (44,8%) e primavera (45,1%), e é maior nas estações com maior número dias de céu aberto e secos, outono (47,6%) e inverno (48,0%). Em relação à fração anual $K_{dIV} = (H_{dIV}^d / H_d^d) = 38,2\%$, a fração sazonal K_{dIV} é maior na primavera (40,1%), igual no verão (38,2%), e menor no outono (34,9%) e inverno (33,9%). Em relação à fração anual $H_{dDIV}^d / H_D^d = 0,511 = 51,1\%$, a fração sazonal H_{dDIV}^d é menor no verão (49,0%) e primavera (49,3%), e maior no outono (52,7%) e inverno (53,9%).

Palavras-chave: radiação solar, radiação infravermelha, equações de estimativa.

INTRODUÇÃO

O conhecimento sobre as frações solares UV, PAR e IV no espectro total, no tempo e espaço, é importante em muitas áreas científica e tecnológica. A fração UV-global (0,28 a 0,385 μ m) da radiação solar global G ($K_{UV} = UV/G$) tem sido investigada em muitos países (Al-Aruri et al, 1988; Robaa, 2004, Cañada et al, 2003, Martinez-Lozano et al, 1999, Jacovides *et al*, 2006, Ogunjobi and Kim, 2004 e Escobedo et al, 2009 e 2011) entre outros. Os resultados mostram que a fração UV/G é altamente dependente das variações da concentração de nuvens, vapor d'água e aerossóis na atmosfera do local, e seu valor varia entre 2.0 % a 9.5%. Estudos sobre as frações UV-difusa na difusa total (UV_d / d) ou UV- direta na radiação direta total (UV_D / D) há pouca informação na literatura.

A fração PAR (0,385-0,7 μ m) da radiação solar global G ($K_{PAR} = PAR/G$) também já foi estudado em muitos locais e com diferentes climas (Jacovides *et al*. 2007; Finch et al.2004; Blackburn e Proctor 1983; Rao 1984 ; de Papaioannou et al. 1993 e 1996; de Stigter e Musabilha 1982 e Escobedo et al 2009 e 2011). Os resultados mostram que a K_{PAR} – global também depende do clima local e a fração PAR/G varia entre 40.8% a 63.1%. Similarmente, de estudos com a radiação PAR- direta bem como da fração PAR-difusa na radiação PAR total (PAR_d / d) mostram dependência das variações da concentração de nuvens, vapor d'água e aerossóis na atmosfera do local (Karalis, 1989, Alados, I., Alados-Arboledas,1999).

A radiação IV (0,7 – 3,0 μ m) é usada na técnica observacional por satélites e em aplicações nas áreas biológicas e agrônômicas. O efeito biológico da radiação IV nas plantas é importante para o desenvolvimento vegetativo da cultura como germinação das sementes, alongamento, floração e coloração dos frutos. A fração IV da radiação global G ($K_{IV} = IV/G$) foi menos estudada que as demais radiações espectrais, e ainda há pouca informação sobre observações experimentais simultâneas das

duas radiações na superfície terrestre. Resultados recentes com a radiação IV-global mostram que a fração K_{IV} depende das condições de cobertura de céu, principalmente da presença de vapor de água na atmosfera, e varia entre 44.0% na cobertura de céu nublado a 51.5% na cobertura de céu aberto (Escobedo et al 2009). Para todas as coberturas de céu juntas, a fração K_{IV} varia entre 46.9% a 51.0%, como mostram os trabalhos de Bolsenga (1997); Zhang (2000), Escobedo et al (2011). Similarmente a radiação UV, existem poucos estudos com as frações IV-difusa na difusa total (IV_d/d) e IV- direta na direta total (IV/D).

Diante da necessidade de se conhecer melhor as relações entre as radiações do espectro total e IV, neste trabalho é apresentado um estudo de modelagem estatística entre as radiações global, difusa e direta infravermelha e as radiações global, difusa e direta do espectro total, para uma base de dados das radiações diárias G, d, IV-global e IV-difusa medidas em Botucatu, SP, Brasil no período de quatro anos, 2003 a 2006.

METODOLOGIA

Análise climática sazonal.

A variabilidade dos valores das radiações global, difusa e direta na horizontal dos espectros total e infravermelho está fortemente associada às variações do clima local. O clima de Botucatu (latitude de 22°54' S, longitude de 48°27' W e altitude de 786 m) é classificado como Cwa (Cepagri, 2012), temperado quente (mesotérmico), o verão é quente e úmido e o inverno é seco. O dia mais longo (solstício de verão) tem 13,4 horas em dezembro, e o mais curto (solstício de inverno) tem 10,6 horas em junho. A evolução sazonal da temperatura e umidade relativa local segue a variação da declinação solar; os valores da temperatura e umidade relativa são maiores na declinação sul e menores quando declina no hemisfério norte. As estações verão e inverno são as estações mais quentes e frias do ano, respectivamente, com temperaturas médias de 22,8°C e 18,4°C, enquanto que o verão e inverno são as estações mais úmidas e a mais seca, com percentuais de 73,9% e 64,8%, respectivamente. A temperatura na primavera, 21,7°C é superior a do outono 18,9°C, enquanto que a umidade é maior no outono 70,5% contra 69,3% na primavera.

A nebulosidade (f), calculada pela expressão $f = 1 - n/N$, expressa a fração do número de horas em que o sol ficou encoberto por nuvens no dia, onde n/N é a razão de insolação, n é o número de horas de brilho solar e N é o fotoperíodo (Iqbal, 1978). A evolução sazonal da nebulosidade segue a variação da série climática da temperatura sendo mais elevada no verão ($f=0,50$) e menor no inverno ($f=0,33$). A nebulosidade na primavera ($f = 0,45$) é superior a do outono ($f = 0,35$)

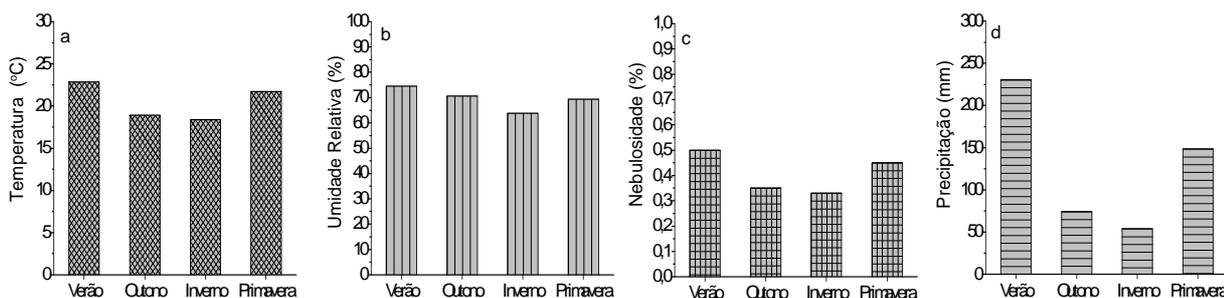


Figura 1: Séries climáticas sazonais da temperatura (a), umidade (a), nebulosidade (b), precipitação (c) do período de 1983 a 2013 em Botucatu.

A evolução sazonal da precipitação segue as evoluções da temperatura e da nebulosidade. É constituída de dois períodos distintos: chuvoso e seco, onde o limite entre os períodos é o valor da precipitação abaixo de 75 mm, aproximadamente. No período chuvoso, nas estações primavera e verão, a precipitação é originada do processo microclimático de convecção livre e macroclimático originado dos eventos meteorológicos de grande escala como Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). No período seco, nas estações outono e inverno, a precipitação é do tipo frontal, resultante de passagem de frentes frias vindas da região polar que geram aumento na nebulosidade e ocorrência de chuvas de média e baixa intensidade nos meses de maio e junho. A frequência média das frentes frias é

de cinco eventos por mês (Satyamurty *et al.*, 1998; Lemos e Calbete 1996). A maior precipitação ocorre no verão com média total de 230,4 mm e a mínima no inverno com 53,8 mm. A precipitação na primavera, 148,5mm, é superior a do outono com 74,2mm.

A cidade de Botucatu com 130 mil habitantes não possui grandes indústrias poluidoras, mas está inserida em uma região rural de cultivo da cana-de-açúcar e produção de álcool. Nos meses do período da seca e início do período chuvoso, de julho a novembro, a atmosfera local apresenta elevada concentração de materiais particulados provenientes das queimadas da cana-de-açúcar, e das usinas que produzem o álcool e açúcar, localizadas num raio de 100 km do centro da cidade, bem como dos aerossóis originados e transportados das intensas queimadas e incêndios, que ocorrem nos meses de setembro a outubro na região centro- oeste do país.

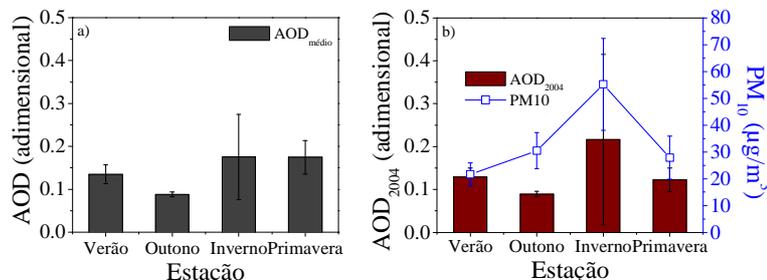


Figura 2: a) Evolução anual da profundidade ótica de aerossóis AOD médias mensais (obtidas do satélite TERRA) no ano de 2001 a 2005. b) Relação entre AOD e a concentração de materiais particulados PM₁₀ em ug.m⁻³ para 2004.

A evolução sazonal das médias sazonais da AOD (profundidade ótica de aerossóis) obtidas pelo satélite TERRA do período de 1998 a 2007, mostra que a partir do início das queimadas da cana-de-açúcar no início do inverno, a concentração de aerossóis aumenta consideravelmente passando por um valor máximo de AOD=0,35 no final do inverno (setembro), o que é equivalente a concentração PM₁₀ de 70,0ug.m⁻³ (Codato *et al.*, 2008). Na primavera, de outubro a dezembro, início do período chuvoso, a concentração de aerossóis decresce gradativamente, aos valores da ordem de AOD=0,16 ou 20,0ug.m⁻³. Na estação seguinte, verão, de janeiro até junho, a concentração de aerossóis continua a decrescer até atingir o outono, o menor nível de concentração PM₁₀, antes de iniciar o novo ciclo.

Medida das radiações global e difusa dos espectros total e infravermelho.

As medidas das radiações global e difusa dos espectros total e infravermelho foram realizadas nos anos de 2003 a 2006, na Estação de Radiometria Solar de Botucatu-SP da UNESP. As irradiâncias global do espectro total e infra-vermelho (I_G^d e I_{GIV}^d) foram medidas por dois piranômetros Eppley PSP com cúpulas de transmissividade nos comprimentos de onda de 0,285 a 3,0um e 0,70 a 3,0um respectivamente. As irradiâncias difusas (I_d^d e I_{dIV}^d) foram monitoradas por dois piranômetros Eppley PSP com cúpulas de transmissividade nos comprimentos de onda de 0,285 a 3,0um e 0,70 a 3,0um respectivamente, utilizando anéis de sombreamento tipo **MEO** (Melo e Escobedo, 1994) com as seguintes especificações: 80cm de diâmetro, 10cm de largura e 1mm de espessura. O sistema operacional do anel de sombreamento **MEO** é inverso do anel de sombreamento de **Drummond**: ao invés da translação do anel, as variações na declinação solar são compensadas por meio da translação do piranômetro numa base móvel mantido sempre à sombra do anel.No sistema **MEO** o anel fixo é inclinado na latitude local, onde eixo central do anel é paralelo a direção polar.



Figura(3) piranometro medindo A global total; b)piranometro com anel de sombreamento a difusa; c) pirametro a IV, e d) piranometro com anel de sombreamento a difusa infravermelho.

As medidas da radiação difusa total e IV necessitaram de correções para compensar a parcela de radiação difusa total e IV obstruídas pelos próprios anéis, os quais dependem fortemente de vários parâmetros, tais como: largura e diâmetro, latitude, declinação solar entre outros. Assim a radiação difusa total e IV medidas pelos anéis de sombreamento *MEO* neste trabalho passaram processo de correção denominado isotrópico (FC), as quais fazem correções em função da geometria do anel de sombreamento, do local e dia. O fator de correção isotrópico (FC) usado para compensar as radiações difusa interceptada pelo anel de sombreamento *MEO*, foram calculados pelas expressões:

$$FC = [1 - (H'_d/H_d)]^{-1} \quad \text{e} \quad FC = [1 - (H'_{div}/H_d)]^{-1} \quad (1)$$

onde H_d ou H_{div} são as radiações difusas, enquanto que H'_d ou H'_{div} são as radiações difusas interceptadas durante o dia pelo anel de sombreamento.

Similarmente, a razão H'_d/H_d ou H'_{div}/H_{div} foram calculadas pela equação(2) proposta por Oliveira et al 2002 em função das dimensões do anel (largura e diâmetro) do dia(declinação solar) e local das medidas(latitude):

$$H'_d / H_d = \left(\frac{2b}{\pi R} \right) \cos(\delta) \left[\frac{\cos(\phi + \delta)}{\cos(\phi)} \right]^2 \int_0^{\omega_p} \cos(z) d\omega \quad (2)$$

onde b e R são a largura e raio do anel, δ é a declinação solar, ϕ é a latitude, z é o ângulo zenital e ω é o ângulo horário do sol, variando do nascer até o pôr do sol. As incertezas nas correções isotrópicas das radiações difusa pelo anel de sombreamento *MEO* em função do tipo de cobertura de céu são: 3,4% parcialmente nublada, 8,3% céu parcialmente nublado com dominância para claro e 12,0% céu aberto. Sobre todas as cobertura de céu juntas, caso do presente estudo, a incerteza da correção é de 4,2% (Dal Pai et al 2011 e 2014). Portanto, o erro da estimativa das irradiancias direta e direta Infravermelha está associado à imprecisão das medidas de I_G e I_d pelos piranômetros da Eppley e à imprecisão das medidas de I_{GIV} e I_{div} pelos piranômetros PSP da Eppley os quais possuem uma incerteza da ordem de 4,1% (Reda, 2008). Logo, as radiações difusa total e IV, possuem incertezas de 8,3%, enquanto que, a radiação direta e direta Infravermelha, obtidas pelo método da diferença por meio das equações: $I_D = I_G - I_d$ ou $I_{DIV} = I_{GIV} - I_{div}$, apresenta incerteza estimada de 12,4%.

Na aquisição dos dados, utilizou-se um Datalogger Campbell 23X, operando na frequência de 1Hz e armazenando médias de 5 minutos. Os dados de irradiancias passaram por um controle de qualidade onde foram eliminados os valores espúrios, e numa segunda etapa, foram processados as integrações das irradiações nas partições horária e diária (Chaves e Escobedo, 2000). A Estação de Radiometria Solar dispõe de um piranometro da Eppley PSP, o qual é utilizado unicamente para aferição dos piranômetros de rotina, periodicamente pelo método comparativo sugerido pela OMM (Fröhlich e London, 1986).

No modelo estatístico estabeleceu correlações anuais e sazonais entre as radiações global (H_G^d), difusa(H_d^d) e direta(H_D^d) do espectro total com as radiações global(H_{GIV}^d), difusa(H_{div}^d) e direta(H_{DIV}^d) do espectro Infravermelho. As equações de estimativa, anuais e sazonais, foram ajustadas através de regressão linear do tipo ($Y = aX$) entre as correlações H_{GIV}^d e H_G^d ; H_{div}^d e H_d^d ; H_{DIV}^d e H_D^d na partição diária. Os indicadores estatísticos utilizados na validação do desempenho das equações de estimativa foram: desvio das médias **MBE** (Mean Bias Error), raiz quadrada do desvio quadrado médio **RMSE** (Root Mean Square Error), e “ d ” de Willmott. Estes índices estatísticas permitem a detecção de subestimativa ou superestimativa, espalhamento ou tendência sistemática e ajustamento, respectivamente.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análise estatística e climática sazonais das radiações.

A evolução temporal de H_G^d , H_d^d e H_D^d do espectro total e de H_{GIV}^d , H_{div}^d e H_{DIV}^d do espectro IV, período de 2003 a 2006 (figura 4) é periódica anual e a sazonalidade é resultante das variações astronômica do sol e climáticas (nuvens, vapor d’água e aerossóis) da atmosfera local. Os valores de H_G^d , H_d^d e H_D^d e das H_{GIV}^d , H_{div}^d e H_{DIV}^d são maiores no período chuvoso, primavera e verão, nas quais o sol declina mais próximo da latitude local e a atmosfera apresenta maiores concentrações de

nuvens e vapor d'água no ano. Por outro lado, foram menores no período seco, outono e inverno, Os valores de H_G^d , H_d^d e H_D^d e de H_{GIV}^d , H_{div}^d e H_{DIV}^d , maiores na declinação sul e na condição de maiores concentrações de nuvens e vapor de água na atmosfera, indicam que o efeito astronômico, é dominante sobre o efeito climático no período úmido..

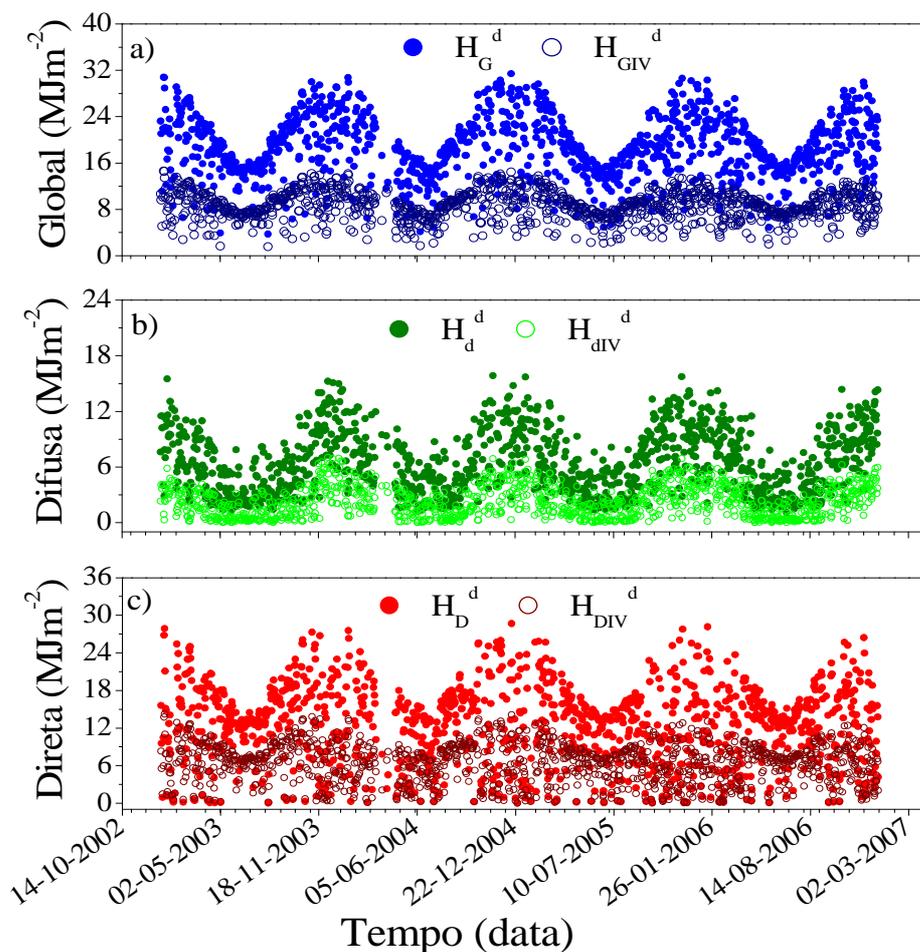


Figura 4 - Evolução das radiações global, direta e difusa diária do espectro total e IV

Os valores de H_{GIV}^d , H_{div}^d e H_{DIV}^d são inferiores respectivamente aos valores de H_G^d , H_d^d e H_D^d porque o espectro IV está contido no espectro total, e em ambos os espectros, os valores das radiações decrescem em seqüência: global, direta e difusa. No período de 2003 a 2006, o valor de H_G^d variou de 3,73MJ/m² a 31,4MJ/m² enquanto que o valor de H_{GIV}^d variou de 1,56MJ/m² a 14,7MJ/m². O valor de H_d^d variou de 1,1MJ/m² a 15,9MJ/m², enquanto que H_{div}^d variou de de 0,005MJ/m² a 7,0MJ/m² O valor H_D^d variou de 0,001MJ/m² a 28,7,0MJ/m², enquanto que H_{DIV}^d variou de de 0,02MJ/m² a 14,2MJ/m². Os valores médios de H_G^d , e H_{GIV}^d , de H_d^d e H_{div}^d e H_D^d e H_{DIV}^d por estação do ano, estão apresentadas na tabela(1)

Estações	Radiações MJ/m ²					
	H_G^d	H_{GIV}^d	H_d^d	H_{div}^d	H_D^d	H_{DIV}^d
Verão	21,1	9,4	8,3	3,1	12,8	6,3
Outono	16,1	7,6	4,2	1,3	11,9	6,3
Inverno	16,5	7,9	4,1	1,2	12,4	6,7
Primavera	21,2	9,6	8,5	3,3	12,6	6,3

Tabela1. Valores sazonais para H_{GIV}^d , H_{div}^d e H_{DIV}^d e de H_G^d , H_d^d e H_D^d

Os resultados mostram que existe uma acentuada simetria entre os valores das radiações do período úmido, entre primavera e verão, bem como, do período seco, entre as estações outono e inverno. Essa simetria indica que os efeitos de absorção e espalhamento por nuvens, vapor de água e aerossóis na extinção das três radiações do espectro total e IV são praticamente iguais entre as estações do período úmido, primavera e verão, e também entre as estações do período seco outono e inverno.

Correlações Anual entre radiações global, difusa e direta dos espectros IV e Total e Validação

A figura 5(a, b, c) mostra as correlações entre os valores de H_{GIV}^d , H_{dIV}^d e H_{DIV}^d do espectro IV e os valores de H_G^d , H_d^d e H_D^d do espectro total respectivamente. As correlações entre H_{GIV}^d e H_G^d (figura 2 a), H_{dIV}^d e H_d^d (figura 2b) e H_{DIV}^d e H_D^d (figura 2c) são lineares em amplos intervalos de variações. As equações lineares (tipo $Y = a X$) obtidas das correlações mostradas na figura 5 (a,b,c) por meio de regressão com respectivos coeficientes de determinação R^2 foram:

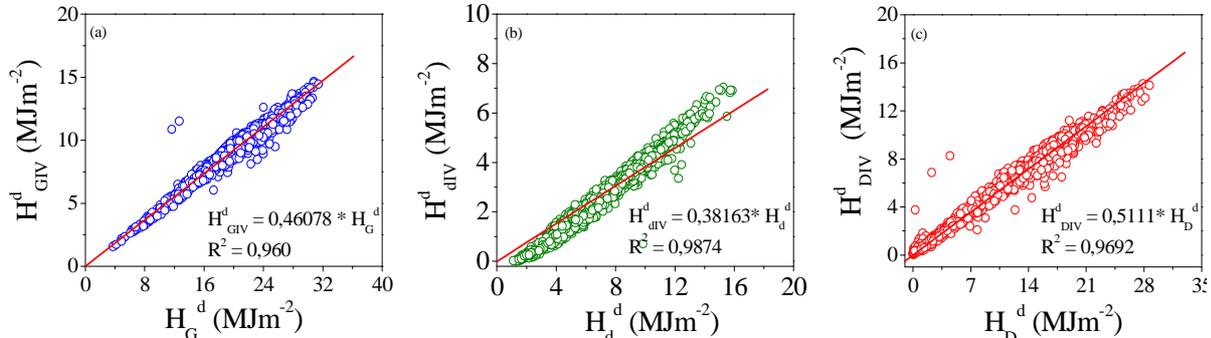


Figura (5abc) Correlações entre os valores de H_{GIV}^d , H_{dIV}^d e H_{DIV}^d do espectro IV e os valores de H_G^d , H_d^d e H_D^d do espectro total, respectivamente.

$$H_{GIV}^d = 0,461 H_G^d \dots\dots\dots R^2 = 0,960 \tag{3}$$

$$H_{dIV}^d = 0,382 H_d^d \dots\dots\dots R^2 = 0,987 \tag{4}$$

$$H_{DIV}^d = 0,511 H_D^d \dots\dots\dots R^2 = 0,969 \tag{5}$$

Os coeficientes angulares das equações 3, 4 e 5, $H_{GIV}^d / H_G^d = 0,461$; $H_{dIV}^d / H_d^d = 0,382$ e $H_{DIV}^d / H_D^d = 0,511$ representam as frações das radiações global, difusa e direta do espectro IV das radiações global, difusa e direta do espectro total: K_{GIV}^d , K_{dIV}^d , e K_{DIV}^d respectivamente. Os elevados valores de R^2 , próximos de 100%, mostram que as radiações do espectro IV e total, H_{GIV}^d e H_G^d , H_{dIV}^d e H_d^d , e H_{DIV}^d e H_D^d estão estatisticamente muito bem correlacionados. A equação 3 mostra que de 100% da radiação global (H_G^d) do espectro total que atingiu a superfície terrestre, 46,1% é do tipo infravermelha (H_{GIV}^d). Os demais percentuais espectrais estão distribuídos para as radiações UV e PAR, cujas frações UV/G e PAR/G em Botucatu é da ordem de 4,2% e 49,0%. respectivamente (Escobedo et al 2011). Para valores sobre todas as coberturas de céu, e para uma base de dados menor que a do presente trabalho, a fração IV/G é igual a 46,9%, para Botucatu no Brasil (Escobedo et al (2011). Similarmente, as equações 4 e 5 mostram que dos 100% das radiações difusa (H_d^d) e direta (H_D^d) espectro total que atingem a superfície terrestre, os percentuais de 38,2% e 51,1% são radiações difusa (H_{dIV}^d) e direta (H_{DIV}^d) espectro infra-vermelho, respectivamente.

A figura 6 (a,b,c) mostra as correlações obtidas na validação entre estimativa de H_{GIV}^d , H_{dIV}^d , e H_{DIV}^d e medida de H_{GIV}^d , H_{dIV}^d , e H_{DIV}^d . As distribuições dos valores estimados e medidos, estão em concordância com as curvas ideais de 45° nos ajustes. Os resultados obtidos para MBE mostram que a equação (3) subestima as medidas em 0,6% . Diferentemente, equação (4) superestima as medidas em 5,0%, enquanto que a equação (5) subestima as medidas em 0,7% .

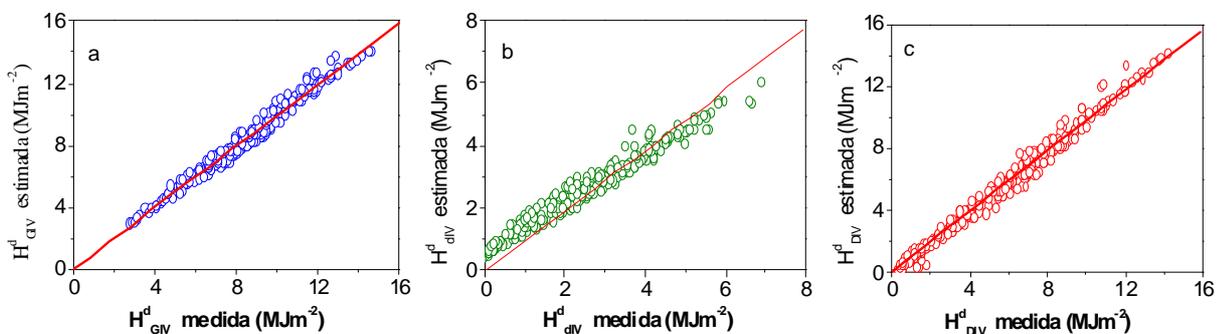


Figura 6(a,b,c). Comparação entre estimativa de H_{GIV}^d , H_{dIV}^d , e H_{DIV}^d e medida de H_{GIV}^d , H_{dIV}^d , e H_{DIV}^d do ano atípico.

Os resultados obtidos para RMSE mostram o que o espalhamento com a equação (3) é da ordem de 5,6%. A equação (4): com RMSE = 20,4% e a equação (5) com RMSE = 9,2%. Os níveis de ajuste d foram superiores 0,98 para as três radiações.

Correlações sazonais entre radiações global, difusa e direta dos espectros IV e Total, e Validação

A figura 7 (a, b, c, d) mostra as correlações sazonais entre os valores de H_{GIV}^d do espectro IV e os valores de H_G^d do espectro total respectivamente no verão, outono, inverno e primavera. Similarmente a figura 7 (e, f, g, h) mostra as correlações entre os valores de H_{div}^d do espectro IV e os valores de H_d^d do espectro total respectivamente nas quatro estações, enquanto a figura 7 (i,j,k,l) mostra as correlações entre os valores de H_{DIV}^d do espectro IV e os valores de H_D^d do espectro total respectivamente nas quatro estações.

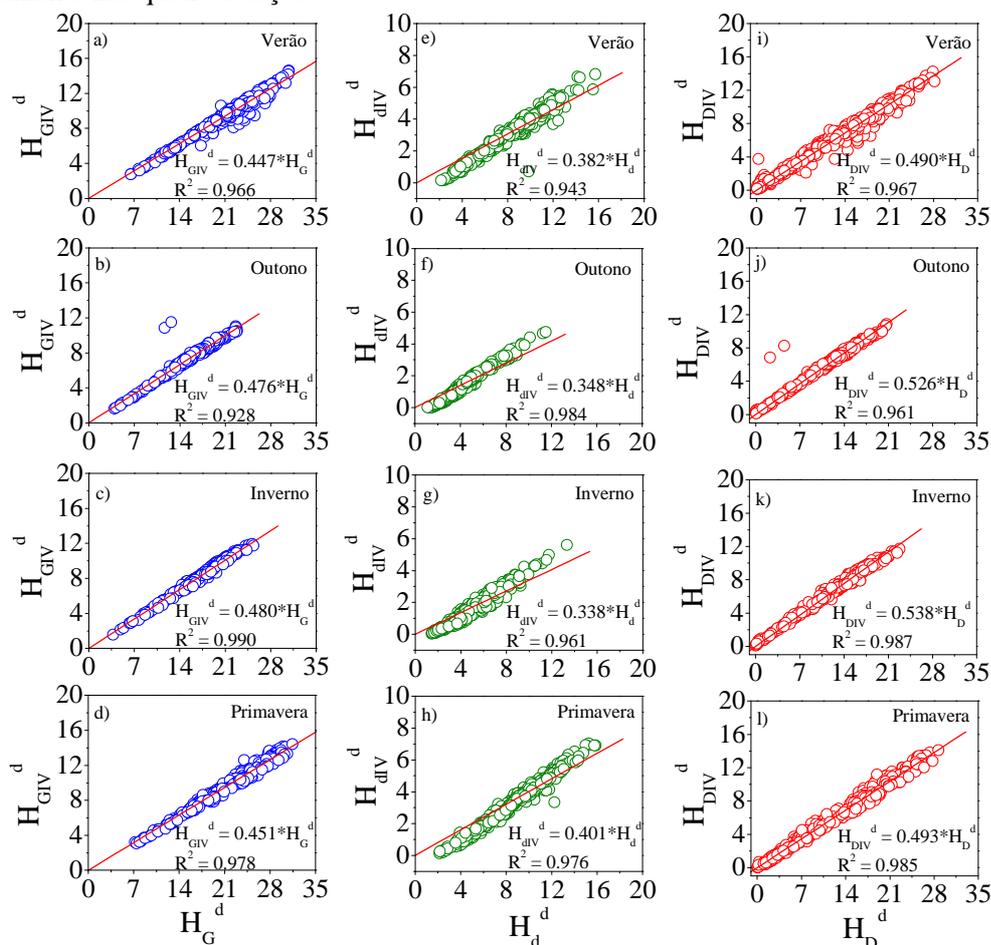


Figura 7 (a, b, c, d) Correlações sazonais entre H_{GIV}^d , e H_G^d . Similarmente, figura 7 (e,f,g,h) correlações sazonais entre H_{div}^d , e H_d^d e a figura 7(i,j,k,l) correlações sazonais entre H_{DIV}^d , e H_D^d .

As correlações sazonais entre os valores de H_{GIV}^d e H_G^d ; H_{div}^d e H_d^d ; H_{DIV}^d e H_D^d , similarmente as correlações anuais, são lineares em amplos intervalos de variações. As equações sazonais (tabela 2) foram obtidas por meio de regressão linear tipo $Y = aX$, por meio das relações entre H_{GIV}^d e H_G^d para cada estação do ano. Os elevados coeficientes de determinação R^2 , superiores 0,928 mostram que H_{GIV}^d e H_G^d estão bem correlacionadas nas quatro estações do ano, com melhores resultados estatisticamente em seqüência para inverno, primavera, verão e outono. O valor da fração H_{GIV}^d / H_G^d nas estações do ano (tabela 2) em relação ao valor da fração anual $H_{GIV}^d / H_G^d = 0,461$ (eq 3) é menor nas estações, quais as coberturas de céu são mais nebulosas e úmidas, verão (44,8%) e primavera (45,1%), e é maior outono (47,6%) e inverno (48,0%), nas estações com dias de céu aberto e secos

Estação	Equação	R ²
Verão	$H_{GIV}^d = 0,448 H_G^d$	0,966
Outono	$H_{GIV}^d = 0,476 H_G^d$	0,928

Inverno	$H_{GIV}^d = 0,480 H_G^d$	0,990
Primavera	$H_{GIV}^d = 0,451 H_G^d$	0,978

Tabela 2. Equações sazonais para H_{GIV}^d e H_G^d

O valor da fração H_{GIV}^d / H_G^d é menor nas estações nebulosas e úmidas, por que a absorção de H_{GIV}^d e H_G^d pelo vapor de água é desproporcional, é maior para H_{GIV}^d que para H_G^d , diminuindo os valor da fração H_{GIV}^d / H_G^d (Martinez-Lozano,1999). Por outro lado, o valor da fração H_{GIV}^d / H_G^d é maior nas estações de céu claro e seca(baixa concentração de vapor de água e com aerossóis) , por que a baixa absorção de H_{GIV}^d e H_G^d pelo vapor de água, e o alto espalhamento pelos aerossóis é desproporcional, é menor ou mais lenta, para H_{GIV}^d que para H_G^d , aumentando o valor da fração H_{GIV}^d / H_G^d . O espalhamento não proporcional na cobertura de céu por aerossóis deve-se ao fato que comprimentos de onda curtos são preferencialmente extintos (Alados e Arboledas 1999).

As equações sazonais (tabela, 3) foram obtidas por meio das relações H_{div}^d e H_d^d para cada estação do ano. Os elevados valores de R^2 , superiores 0,943 mostram que H_{div}^d e H_d^d estão bem correlacionadas estatisticamente nas quatro estações do ano. Os resultados são mais significativos estatisticamente em seqüência para o outono, primavera, inverno e verão.

Estação	Equação	R^2
Verão	$H_{div}^d = 0,382 H_d^d$	0,943
Outono	$H_{div}^d = 0,349 H_d^d$	0,984
Inverno	$H_{div}^d = 0,339 H_d^d$	0,961
Primavera	$H_{div}^d = 0,401 H_d^d$	0,976

Tabela 3. Equações sazonais para H_{div}^d e H_d^d

Em relação ao valor da fração total $H_{div}^d / H_d^d = 0,382$ (equação 4), os valores das frações H_{div}^d / H_d^d (tabela 3) são maiores nas estações mais nebulosas e úmidas, verão(38,2%) e primavera(40,1%), e são menores nas estações de baixa nebulosidades e secas, outono (34,9%) e inverno(33,9%). Os valores das frações H_{div}^d / H_d^d são maiores nas estações nebulosas e úmidas, por que a extinção de H_{div}^d e H_d^d é desproporcional, é maior para H_d^d que para H_{div}^d , aumentando os valor da fração H_{div}^d / H_d^d .

Por outro lado, os valores das frações H_{div}^d / H_d^d são menores nas estações de baixa nebulosidade e seca com aerossóis , por que o espalhamento de H_{div}^d e H_d^d pelos aerossóis é maior para H_d^d que para H_{div}^d , diminuindo o valor da fração H_{div}^d / H_d^d .

As equações sazonais (tabela 4) foram obtidas similarmente a equação anual (5) por meio das relações H_{DIV}^d e H_D^d para cada estação do ano. Os elevados coeficientes de determinação R^2 , superiores 0,961 mostram que H_{DIV}^d e H_D^d estão bem correlacionadas estatisticamente nas quatro estações do ano, com melhores resultados em seqüência para inverno, primavera, verão e outono.

Estação	Equação	R^2
Verão	$H_{DIV}^d = 0,490 H_D^d$	0,967
Outono	$H_{DIV}^d = 0,527 H_D^d$	0,961
Inverno	$H_{DIV}^d = 0,539 H_D^d$	0,987
Primavera	$H_{DIV}^d = 0,493 H_D^d$	0,985

Tabela 4. Equações sazonais para H_{DIV}^d e H_D^d

Os valores das frações H_{DIV}^d / H_D^d (tab4) em relação ao valor da fração total $H_{DIV}^d / H_D^d = 0,511$ (equação 5) ou 51,1%, são menores nas estações de verão(49,0%) e primavera(49,3%) onde as estações são mais nebulosas e úmidas, e são maiores nas estações de outono(52,7%) e inverno(53,9%) onde as estações do ano apresentam mais dias de céu aberto e secos. Similarmente, as variações da fração H_{GIV}^d / H_G^d , os valores das frações H_{DIV}^d / H_D^d é menor nas estações verão e primavera por que a absorção de H_{DIV}^d e H_D^d pelo vapor de água é maior para H_{DIV}^d que para H_D^d , diminuindo os valor da fração H_{DIV}^d / H_D^d . Ao contrario o valor da fração H_{DIV}^d / H_D^d é maior nas estações outono e inverno e o espalhamento pelos aerossóis é , é menor para H_{DIV}^d que para H_D^d , aumentando o valor da fração H_{DIV}^d / H_D^d . A figura 8 mostra as correlações obtidas na validação entre estimativa de H_{GIV}^d , H_{div}^d , e H_{DIV}^d e medida de H_G^d , H_d^d , e H_D^d para a base de dados do ano atípico. As distribuições dos valores estimados e medidos para as radiações global, difusa e direta, estão em concordância linear

com as curvas ideais de 45° . O coeficiente de correlação r mostrado na figura 8 indica a qualidade do ajuste entre a medida e a estimativa nas estações do ano. Quanto mais próximo de 1 for o valor de r na correlação, melhor o ajuste estatístico entre a medida e a estimativa do modelo. Para a H_{GIV}^d os melhores resultados foram em seqüência para as estações, primavera, inverno, outono e verão; para H_{DIV}^d e H_{DIV}^d foram outono, primavera, inverno e verão.

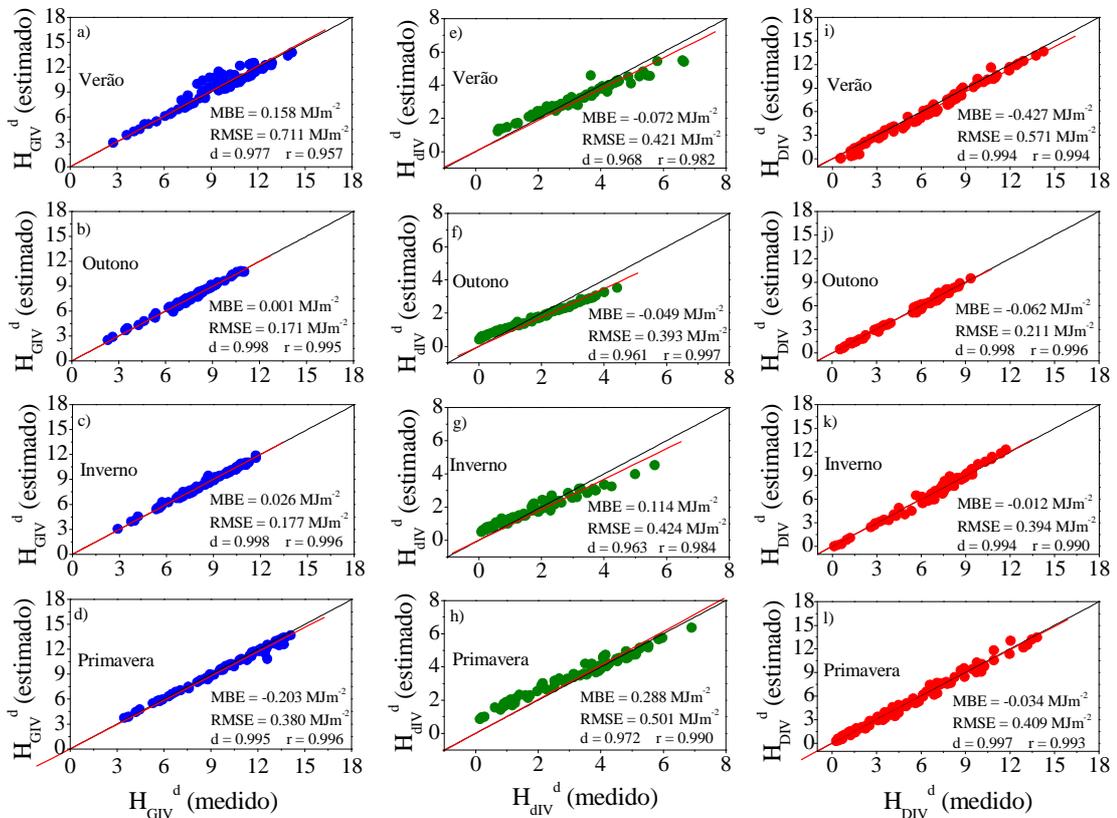


Figura 8 Comparação entre estimativa de H_{GIV}^d , H_{DIV}^d , e H_{DIV}^d e medida de H_{GIV}^d , H_{DIV}^d , e H_{DIV}^d sazonais do ano atípico.

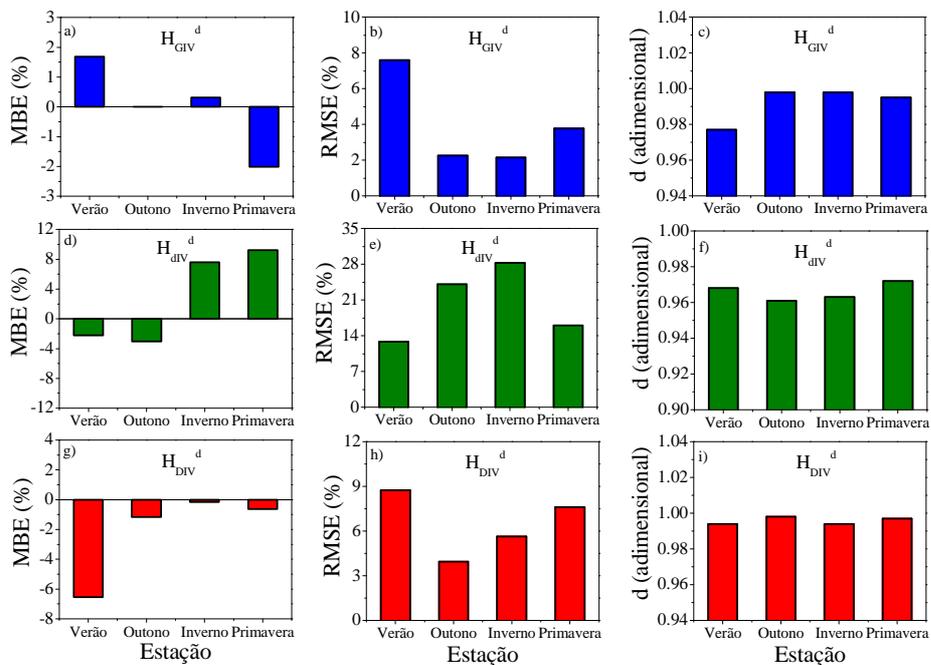


Figura 9: Indicativos estatísticos MBE, RMSE e d de Willmott na validação das equações sazonais das tabelas(2,3 e 4)

Os indicativos estatísticos MBE, RMSE e d de Willmott, obtidos da comparação dos valores estimados de H_{GIV}^d , H_{dIV}^d , e H_{DIV}^d e medida de H_{GIV}^d , H_{dIV}^d , e H_{DIV}^d sazonais pelas equações (tabela 2,3,4) são mostradas na figura (8) e representados graficamente na figura(9). Entre os valores estimados de (H_{GIV}^d) e as medidas (H_{GIV}^d), os resultados obtidos para MBE (fig9a) mostram que as equações (tab2) superestimam as medidas em 3 estações do ano: verão em 1,7 %, outono em 0,1%, inverno em 0,3% e subestima na primavera em 2,0%. Os resultados obtidos para RMSE (fig 9b) mostram o que o espalhamento com a equação (tab1) é maior no verão (RMSE = 7,6%), decrescendo em seqüência nas estações primavera (RMSE = 3,8%), outono(RMSE = 2,3%), e inverno (RMSE = 2,1%). O ajuste d (fig 9c) foram estatisticamente melhores em seqüência para as estações outono(0,998), inverno(0,998), primavera (0,995) e verão(0,977). Entre os valores estimados de (H_{dIV}^d) e as medidas (H_{dIV}^d), os resultados obtidos para MBE (fig 9d) mostram que as equações (tab3) subestimam as medidas em 2 estações do ano: verão em 2,2 %, outono em 3,0%, e superestimam no inverno em 7,6% e na primavera em 9,2%. Os resultados obtidos para RMSE (fig 9e) mostram que o espalhamento com a equação (tab3) foram menores na seqüência nas estações verão com RMSE = 12,9% e primavera RMSE = 16,0%, e foram maiores nas estações outono com RMSE = 24,1%) e inverno RMSE = 28,3%. O ajuste d (fig 9f) foram elevados, superiores a 0,96 e estatisticamente melhores em seqüência para as estações primavera(0,972), verão(0,968), inverno(0,963) e outono (0,961). Entre os valores estimados (H_{DIV}^d) e as medidas (H_{DIV}^d), os resultados obtidos para MBE (figura9g) mostram que as equações (tabela 4) subestimam as medidas nas 4 estações do ano: verão em 6,5 %, outono em 1,1%, inverno em 0,2% e primavera em 0,6%. Os resultados obtidos para RMSE (fig 9h) mostram o que o espalhamento é maior em seqüência no verão (RMSE = 8,7%) e na primavera (RMSE = 3,8%), e menor em seqüência no inverno (RMSE = 5,6%) e outono(RMSE = 3,9%). Os ajustes d (figura 9i) foram elevados e superiores 0,998 e estatisticamente melhores em seqüência para as estações outono(0,998), primavera (0,997), inverno(0,994) e verão(0,974)

Comparação das equações de estimativas sazonais e anual .

Para análise sazonal das equações de estimativas obtidas nas seções anteriores, calculou-se desvio relativo $D(\%)$ por meio da equação (6) entre os coeficientes angulares das equações anuais (a_a) e das equações sazonais no verão, outono, inverno e primavera (a_s) como mostrado na figura10 (a,b,c) :

$$D(\%) = 100*(a_s - a_a)/a_s \dots\dots\dots(6)$$

O desvio percentual $D(\%)$ expressa a capacidade de H_{GIV}^d , H_{dIV}^d , e H_{DIV}^d sazonal de superestimar ou subestimar H_{GIV}^d , H_{dIV}^d , e H_{DIV}^d anual. Para a estimativa de H_{GIV}^d , os valores dos desvios $D(\%)$ mostram que o valor H_{GIV}^d , sazonal subestima aos valores das H_{GIV}^d , anual no verão e primavera em 2,9% e 2,1% respectivamente, e superestima nas estações outono e inverno em 3,2% e 4,1% respectivamente; Para a estimativa de H_{dIV}^d , os valores dos desvios $D(\%)$ mostram que o valor H_{dIV}^d , sazonal superestima aos valores das H_{dIV}^d , anual no verão e primavera em 0,21% e 4,9% respectivamente, e subestima nas estações outono e inverno em 9,5% e 12,6% respectivamente;

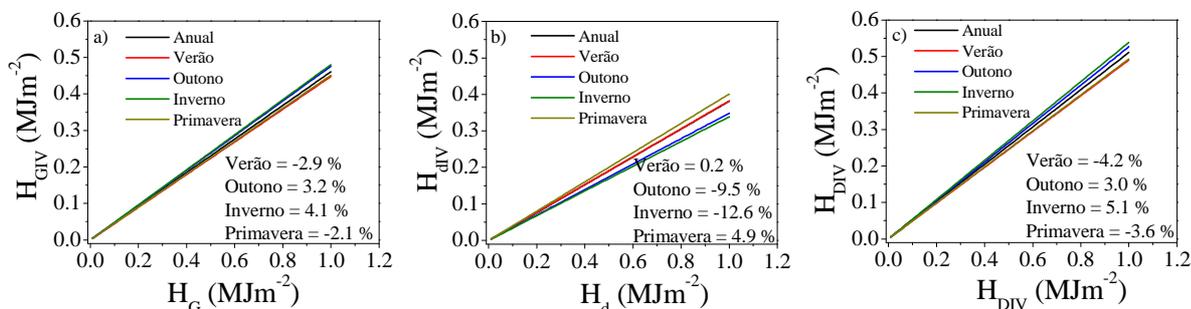


Figura 10 (a,b,c) curva estimada de H_{GIV}^d , H_{dIV}^d , e H_{DIV}^d sazonal e as curvas estimadas H_{GIV}^d , H_{dIV}^d , e H_{DIV}^d anuais em função de H_{G}^d , H_{d}^d , e H_{IV}^d .

Para a estimativa de H_{DIV}^d , os valores dos desvios $D(\%)$ mostram que o valor H_{DIV}^d , sazonal subestima aos valores das H_{DIV}^d , anual no verão e primavera em 4,2% e 3,6% respectivamente, e superestima nas estações outono e inverno em 3,0% e 5,1% respectivamente.

CONCLUSÕES

Dos resultados apresentados e discutidos neste trabalho pode-se concluir que os valores de H_G^d , H_d^d e H_D^d do espectro total e de H_{GIV}^d , H_{DIV}^d e H_{DIV}^d do espectro IV dependem das variações astronômicas e climáticas: são maiores na primavera e verão, condições atmosférica de maior nebulosidade e vapor de água, e são menores no outono e inverno, condição atmosférica de baixa concentrações de nuvens, vapor de água e alta concentração de aerossóis. As equações anuais bem como as equações sazonais obtidas por meio das relações H_G^d e H_{GIV}^d ; H_{DIV}^d e H_d^d ; H_{DIV}^d e H_D^d por regressão linear tipo $Y = aX$ apresentaram elevados coeficientes de determinação R^2 . A validação das equações anual e sazonal por meio dos indicativos estatísticos MBE, RMSE e d de Willmott mostram que as mesmas podem ser utilizadas com precisão e exatidão nas estimativas das radiações do espectro IV a partir das radiações do espectro total. A análise comparativa entre os coeficientes angulares das equações sazonais e anuais mostram que: a estimativa de H_{GIV}^d pela sazonal no verão e primavera subestima ao da H_{GIV}^d da anual em 2,9% e 2,1% respectivamente, e superestima no outono e inverno em 3,2% e 4,1% respectivamente; a estimativa de H_{DIV}^d , anual subestima aos de H_{DIV}^d , sazonais no verão e primavera em 0,21% e 4,9% respectivamente, enquanto que os de H_{DIV}^d anual superestima no outono e inverno em 9,5% e 12,6% respectivamente; a estimativa de H_{DIV}^d anual superestima aos de H_{DIV}^d , sazonais no verão e primavera em 4,2% e 3,6% respectivamente, enquanto que os de H_{DIV}^d anual subestima nas estações outono e inverno em 3,0% e 5,1% respectivamente

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alados, I., Alados-Arboledas, L. Direct and diffuse photosynthetically active radiation: measurements and modelling. *Agric. and For. Meteorol.*, v.93, p.27-38, 1999.
- Al-Aruri S, Rasas M, Al-Jamal K, Shaban N. An assessment of global UV solar radiation in the range (0.290-0.385 μm) in Kuwait. *Solar Energy* 1988;41:159-62.
- Blackburn WJ, Proctor JTA. Estimating photosynthetically active radiation from measured solar irradiance. *Solar Energy* 1983;31:233-34.
- Bolsenga SJ, Near Infrared Radiation in Northern Greenland. *Journal Applied Meteorology*, 1997, 6, 449-451.
- Cañada J, Pedros G, Bosca JV. Relationships between UV (0.290-0.385 μm) and broad band solar radiation hourly values in Valencia and Córdoba, Spain. *Energy* 2003; 28:199-217.
- Chaves M., Escobedo, J.F. A software to process daily solar radiation data. *Renewable Energy*, v19, n°1, p339-344, 2000.
- CEPAGRI – Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima_muni_086.html, acesso em 14/09/2012.
- Codato, G.; Oliveira, A. P.; Soares, J.; Escobedo, J. F.; Gomes, E. G.; Dal Pai, A. Global and diffuse solar irradiances in urban and rural areas in southeast Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 93, p.57–73, 2008.
- Dal Pai, A.; Escobedo, J. F. Correa, F. H. Numerical correction for the diffuse solar irradiance by the Melo-Escobedo shadowing measuring method In: ISES SOLAR WORLD CONGRESS 2011, 2011 Kassel.
- Dal Pai, A.; Escobedo, J. F. Correa, Dal Pai, E.; Santos M. C. Estimation of Hourly, Daily and Monthly mean Diffuse Radiation Based Shadowing Correction. *Energy Procedia* 57(2014) 1150 - 1159
- Escobedo J. F., Gomes E., Oliveira A. P., Soares J. Modeling hourly and daily fractions of UV, PAR and NIR to global solar radiation under various sky conditions at Botucatu, Brazil. *Applied Energy* 86, 299-309, 2009.
- Escobedo J. F., Gomes E. N., Oliveira A. P., Soares J. R. Ratios of UV, PAR and NIR components to global solar radiation measured at Botucatu site in Brazil. *Renewable Energy* 36, 169-178, 2011
- Finch DA, Bailey WG, McArthur LJB, Nasitwitwi M. Photosynthetically active radiation regimes in a southern African savanna environment. *Agricultural and Forest Meteorology* 2004;122:229-38.
- Fröhlich C, London J. Revised Instruction manual on radiation instruments and measurements. WCRP Publications series No. 7. WMO/TD No. 149, October 1986.
- Jacovides CP, Assimakopoulos VD, Tymvios FS, Theophilou K, Assimakopoulos DN. Solar global UV (280-380nm) radiation and its relationship with solar global radiation measured on the island of Cyprus. *Energy* 2006;31:2728-38.

- Jacovides CP, Tymvios FS, Assimakopoulos VD, Kaltsounides NA. The dependence of global and diffuse PAR radiation components on sky conditions at Athens, Greece. *Agricultural and Forest Meteorology* 2007;143:277-87.
- Karalis JD. Characteristics of direct photosynthetically radiation. *Agricultural and Forest Meteorology* 1989;48:225-34.
- Lemos, C.F.; Calbete, N. O. Sistemas frontais que atuaram no litoral de 1987-1995. **Climanálise**, Edição comemorativa 10 anos, 1996. (INPE-10717-PRE/6178).
- Martinez-Lozano JA, Tena F, Utrillas MP. Ratio of UV to global broad band irradiation in Valencia, Spain. *International Journal of Climatology* 1999;19:903–11.
- Melo, J.M.D.; Escobedo, J.F. Medida da radiação solar difusa. VII Congresso Ibérico de Energia Solar, Vigo, Espanha. *Anais do Internacional Solar Energy Society*, v.1, 1994.
- Ogunjobi KO, Kim YJ. Ultraviolet (0.280-0.400 μm) and broadband solar hourly radiation at Kwangju, South Korea: analysis of their correlation with aerosol optical depth and clearness index. *Atmospheric Research* 2004;71:193-214.
- Oliveira, A.P., Escobedo, J.F., Machado, A.J. A new shadow-ring device for measuring diffuse solar radiation at surface. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Boston, v.5, p 698-708, 2002.
- Papaioannou G, Nikolidakis G, Assimakopoulos D, Retalis D. Photosynthetically active radiation in Athens. *Agricultural and Forest Meteorology* 1996;81:287–298.
- Papaioannou G, Papanikolaou N, Retalis D. Relationships of photosynthetically active radiation and shortwave irradiance. *Theoretical and Applied Climatology* 1993;48:23-27.
- Rao CRN. Photosynthetically active components of global solar radiation: measurements and model computations. *Archives for Meteorology, Geophysics, and Bioclimatology* 1984;34:353-64.
- Reda, I.M.; Myers, D.R.; Stoffel, T.L. *Uncertainty Estimate for the Outdoor Calibration of Solar Pyranometers*: NCSLI Measure, *The Journal of Measurement Science*; 3(4), pp. 58-66, 2008.
- Robaa SM. A study of ultraviolet solar radiation at Cairo urban area, Egypt. *Solar Energy* 2004;77:251-59.
- Satyamurty, P.; Nobre, C. A.; Silva Dias, P. L. Topics: South America. *Meteorological Monographs*, v.27, n.49, p.119-139, 1998.
- Stigter CJ, Musabilha MM. The conservative ratio of photosynthetically active to total radiation in the tropics. *Journal of Applied Ecology* 1982;19:853-58.
- Zhang X, Zhang Y, Zhou Y. Measuring and modelling photosynthetically active radiation in Tibet Plateau during April- October. *Agricultural Meteorology* 2000;102:207-12.

EQUATIONS OF SEASONAL ESTIMATES OF INFRARED GLOBAL, DIFFUSE AND DIRECT RADIATION IN BOTUCATU/SP/BRAZIL

SUMMARY This study presents equations for seasonal estimates of infrared global ($H_{\text{GNIR}}^{\text{d}}$), diffuse ($H_{\text{dNIR}}^{\text{d}}$) and direct ($H_{\text{DNIR}}^{\text{d}}$) radiation as a function of global (H_{G}^{d}), diffuse (H_{d}^{d}) and direct (H_{D}^{d}) radiation of the total spectrum, respectively. Radiation values for the database were measured from 2003 to 2006 in Botucatu/SP/Brazil. Radiation of the total and NIR spectra was correlated in pairs by linear regression as ($Y = a X$) and the determination coefficients, close to 100%, showed that $H_{\text{GNIR}}^{\text{d}}$, $H_{\text{dNIR}}^{\text{d}}$ and $H_{\text{DNIR}}^{\text{d}}$ radiation is seasonally well correlated with H_{G}^{d} , H_{d}^{d} and H_{D}^{d} radiation, respectively. In relation to the annual fraction $K_{\text{GNIR}} = (H_{\text{GNIR}}^{\text{d}} / H_{\text{G}}^{\text{d}}) = 46.1\%$, K_{GNIR} seasonal fraction is lower in cloudy and wet seasons, summer (44.8%) and spring (45.1%); and it is higher in seasons with greater number of days of clear and dry sky conditions, autumn (47.6%) and winter (48.0%). In relation to the annual fraction $K_{\text{dNIR}} = (H_{\text{dNIR}}^{\text{d}} / H_{\text{d}}^{\text{d}}) = 38.2\%$, K_{dNIR} seasonal fraction is higher in the spring (40.1%); is equal in the summer (38.2%) and and it is lower in the autumn (34.9%) and winter (33.9%). In relation to the annual fraction $K_{\text{DNIR}} / H_{\text{D}}^{\text{d}} = 0.511=51,1\%$, K_{DNIR} seasonal fraction is lower in the summer (49.0%) and spring (49.3%); and it is higher in the autumn (52.7%) and winter (53.9%).

Keywords: Solar radiations, infrared radiation, estimate equations.