

# ESTIMATIVAS DAS FRAÇÕES SOLARES GLOBAL ( $\bar{K}_{NIR}^G$ ) E DIFUSA ( $\bar{K}_{NIR}^d$ ) INFRAVERMELHA EM FUNÇÃO DAS FRAÇÕES $K_t$ E $K_d$ DO ESPECTRO TOTAL

**Taiza Juliana Rossi** – taizaiv@gmail.com

**Eduardo Nardini Gomes** – engomes@gmail.com

**Joao Francisco Escobedo** – escobedo@fca.unesp.br

**Mauricio Bruno Prado da Silva** – mauricio.prado19@hotmail.com

**Luciano Ronaldo Rossi** – ecofoco@live.com

Universidade Estadual Paulista – UNESP, Departamento de Engenharia Rural

**Cicero Manoel dos Santos** – ciceromanoel2007@gmail.com

Universidade Federal do Pará -UFPA

**Resumo.** O trabalho descreve a obtenção e a validação de equações de estimativas para frações solares global ( $\bar{K}_{NIR}^G$ ), difusa ( $\bar{K}_{NIR}^d$ ) do espectro infravermelho em função das frações solares  $K_t$  e  $K_d$  do espectro total. A base de dados das radiações foi medida no período de 2003 a 2006 em Botucatu/SP/Brasil. No modelo estatístico proposto, os valores médios de  $\bar{K}_{NIR}^G$  e  $\bar{K}_{NIR}^d$  foram equacionados em função de  $K_t$  por meio de regressão linear e polinomial, respectivamente. Similarmente, os valores médios de  $\bar{K}_{NIR}^d$  foram equacionadas em função de  $K_d$  por meio de regressão polinomial. O coeficiente de determinação obtidos para as correlações em função de  $K_t$  e  $K_d$  foram superiores  $R^2 = 0,9600$ . Os indicativos estatísticos obtidos na validação:  $\bar{K}_{NIR}^G$  (MBE = 2,8% e RMSE = 3,8%) e  $\bar{K}_{NIR}^d$  (MBE = 1,0% e RMSE = 13,7%) mostram que as equações podem ser utilizadas nas estimativas de  $\bar{K}_{NIR}^G$  e  $\bar{K}_{NIR}^d$  em função de  $K_t$ , respectivamente, com precisão e exatidão. Similarmente,  $\bar{K}_{NIR}^d$  (MBE = 0,5% e RMSE = 10,7%) na estimativa de  $\bar{K}_{NIR}^d$  em função de  $K_d$ .

*Palavras-chave:* Radiação solar global, difusa e direta, Radiação solar infravermelha.

## 1. INTRODUÇÃO

A radiação infravermelha do espectro total é constituída das seguintes bandas espectrais: infravermelho próximo (NIR) de 0,78-3,0  $\mu\text{m}$ , infravermelho médio (MIR) de 3,0-50  $\mu\text{m}$  e infravermelho distante (FIR) de 50-1000  $\mu\text{m}$ . A banda NIR tem grande importância como fonte renovável de energia, porque representa uma larga quantidade de energia do espectro total, em torno de 46,5%, e é responsável pelo aquecimento e iluminação natural de ambientes, entre muitas outras aplicações na superfície da Terra. Nas áreas da meteorologia e climatologia, a NIR é usada em técnica observacional por satélites, em estudos de propriedades físicas de nuvens, e do efeito estufa na atmosfera (Larsen N F, Stamnes, K, 2005, Carrer et al., 2012; Radel et al., 2015; Dombrovsky et al, 2016). Nas áreas agrônômica e Biológica, mesmo que seja pouca absorvida pelas plantas, a NIR é usada na secagem natural de produtos agrícolas e é fundamental no aquecimento interno, em ambientes protegido, nos meses frios, para manter as condições térmicas ideais (Lamnatou e Chemisana et al., 2013). Outros trabalhos com casa de vegetação aperfeiçoam o aproveitamento da radiação NIR refletida para conversão de energia por meio de concentradores solares (Sonneveld et al., 2010a). Na saúde a NIR exerce efeito positivo no metabolismo humano. O corpo humano composto de 70% de água, pode potencialmente acumular uma grande quantidade de energia por meio da forte absorção da NIR solar, a qual é usada em processos biológicos (Yao et al., 2009, Tsai e Hamblin, 2017). A pré-irradiação do infravermelho solar, protege os fibroblastos da pele humana contra os efeitos citotóxicos da radiação UVA e UVB (Salatiel et al., 1998). Dependendo da faixa de comprimento de onda, a NIR pode penetrar a epiderme, derme e tecido subcutâneo em diferentes extensões, (Barolet et al., 2015), por isso, tem sido usada efetivamente como uma opção terapêutica para tratar/aliviar certas doenças (autoimunidade, inflamação, distúrbios de cicatrização de feridas), alívio da dor e desconfortos (Vatansever e Hamblin, 2012; Tsai e Hamblin, 2017). Dentre as bandas espectrais, a radiação NIR é a menos estudada, quando comparada com as demais radiações Ultravioleta (UV) e a fotossinteticamente ativa (PAR), quer seja por meio de séries (medidas) ou por modelos de estimativas. As séries são resultados de medidas no tempo e espaço, e tem como vantagem, conhecer a disponibilidade da radiação NIR sem necessidade de outras medidas. No entanto, há pouca informação na literatura medidas em series longas da NIR (Escobedo et al, 2014). Ao contrário das séries, os modelos de estimativas da radiação NIR necessitam de outras medidas das superfícies terrestre, como mostram os estudos de estimativas com as irradiações global NIR ( $H_{NIR}^G$ ), difusa NIR ( $H_{NIR}^d$ ) e direta NIR ( $H_{NIR}^D$ ), quais utilizam as medidas das irradiações global e difusa do espectro total (Escobedo et al 2009 e Rossi et al 2015 e 2016). O modelo mais comum

é o estatístico, e relaciona as irradiações dos dois espectros  $H_{NIR}$  e  $H$ , por meio de regressão linear tipo ( $H_{NIR} = K_{NIR} \times H$ ) em que  $K_{NIR}$  é a razão ou fração da NIR irradiação total. Esse modelo é simples, mas tem a desvantagem de ser preciso apenas para locais específicos de origem das medidas. Resultados obtidos com as irradiações global NIR e total, mostram que o valor da fração  $K_{NIR}^G$  anual, para todas as coberturas de céu juntas, é da ordem de 46,9%. Sazonalmente, o valor de  $K_{NIR}^G$  é menor no verão (44,8%) e primavera (45,1%), e maior no outono (47,6%) e inverno (48,0%). O valor de  $K_{NIR}^G$  depende das condições de cobertura de céu, e podem variar do valor  $K_{NIR}^G = 44,0\%$  na cobertura de céu nublado até  $K_{NIR}^G = 51,5\%$  na cobertura de céu aberto (Escobedo et al 2009 e Rossi et al 2015 e 2016).

Similarmente, as correlações entre as irradiações difusas ( $H_{NIR}^d$ ) e ( $H^d$ ), bem como entre as irradiações direta ( $H_{NIR}^D$ ) e ( $H^D$ ), mostram que os valores de  $K_{NIR}^d = H_{NIR}^d / H^d = 38,2\%$  e  $K_{NIR}^D = H_{NIR}^D / H^D = 51,1\%$  respectivamente. Sazonalmente, o valor de  $K_{NIR}^d$  é o mesmo no verão (38,2%) e maior na primavera (40,1), enquanto que  $K_{NIR}^d$  é menor no outono (34,9%) e inverno (33,9%). Ao contrário,  $K_{NIR}^D$  é menor no verão (49,0%) e primavera (49,3%), e é maior no outono (52,7%) e inverno (53,9%). O valor de  $K_{NIR}^D$  também depende das condições de cobertura de céu, e varia de  $K_{NIR}^D = 41,0\%$  na cobertura de céu nublado até a  $K_{NIR}^D = 38,2\%$  na cobertura de céu aberto. O valor de  $K_{NIR}^D$  não depende da cobertura de céu, é aproximadamente constante igual a 51,4% ( Rossi et al 2015 e 2016).

Diante da necessidade de se conhecer melhor as relações entre as irradiações dos espectros total e NIR, neste trabalho é proposto um modelo estatístico que correlaciona as frações  $K_{NIR}^G$ ,  $K_{NIR}^d$  e  $K_{NIR}^D$  com a fração transmitida da irradiação global ( $K_t = H^G / H^0$ ) transmitida ou com a fração da irradiação difusa na irradiação global ( $K_d = H^d / H^G$ ) na superfície atmosférica. O modelo das frações elimina a dependência do dia e local, permitindo a estimativa das irradiações solar NIR em qualquer local de clima similar. A principal vantagem é que se permite melhor observar a dependência do clima ou das variações das nuvens vapor de água e aerossóis, nas relações entre as irradiações de ambos os espectros solares. Assim, o trabalho com os seguintes objetivos: propor equações de estimativas por meio regressão de  $K_{NIR}^G$ ,  $K_{NIR}^d$  e  $K_{NIR}^D$  em função de  $K_t$  e  $K_d$  sob todas as condições de céu; validar as equações de estimativas obtidas para base de dados típicas e atípicas.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1. Análise climática sazonal local.

As medidas foram obtidas da Estação de Radiometria Solar localizada na área rural de Botucatu, na FCA/UNESP, Latitude 22.85°S, Longitude 48.45°O e 786 metros acima do nível do mar que está aproximadamente a 221 km do Oceano Atlântico. A cidade de Botucatu tem um elevado gradiente de altitude entre 400 m na região mais baixa e entre 980 m na região montanhosa mais alta o que provoca mudanças na temperatura do ar e nos ventos (Santos e Escobedo, 2016). A cidade está inserida numa região com duas grandes represas (Barra Bonita que possui reservatório de  $\approx 308$  km<sup>2</sup> e distante 30 km; Jurumirim distante 70 km com reservatório de  $\approx 449$  km<sup>2</sup>) e de áreas com grandes plantações de eucaliptos e cana de açúcar, que ocasionam mudanças na cobertura do solo e do microclima local, aumentando a concentração do vapor de água, o balanço de radiação, alterando transmissão da NIR na atmosfera e a microfísica das nuvens Fig. 1.

A variabilidade dos valores das radiações global, difusa e direta na horizontal dos espectros total e infravermelho está fortemente associada às variações sazonais do clima local. O Estado de São Paulo tem sete tipos climáticos distintos, principalmente clima úmido, com predominância do clima Cwa em toda região central do estado. Com base em dados pluviométricos e termométricos mensais, o clima de Botucatu é classificado como **Cwa** (CPA, 2017), 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.

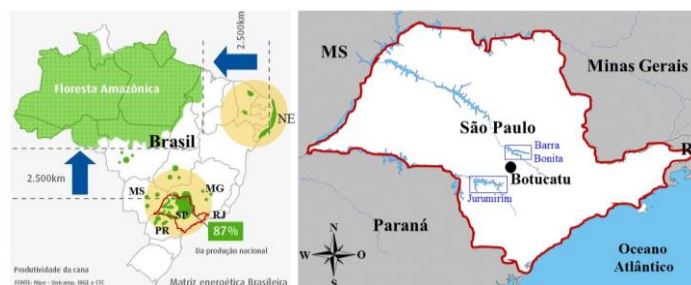


Figura 1. Local das medidas, visualização da área de plantio da cana de açúcar e fontes de vapor de água na região de Botucatu. Adaptado de UNICA <http://www.unica.com.br/production-map/> e Google imagens.

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. Verão e inverno são as estações mais quentes e frias do ano, respectivamente, com temperaturas médias de  $22.29 \pm 0.22^\circ\text{C}$  e

$18.29 \pm 1.33^\circ\text{C}$ , enquanto que o verão e inverno são as estações mais úmidas e a mais seca, com percentuais de  $74.79 \pm 1.82\%$  e  $63.01 \pm 1.81\%$ , respectivamente Fig 2a e b. A temperatura na primavera,  $21.37 \pm 0.74^\circ\text{C}$  é superior a do outono  $18.41 \pm 2.21^\circ\text{C}$ , enquanto que a umidade é maior na primavera  $68.37 \pm 1.92\%$  contra  $69.83 \pm 1.46\%$  no outono.

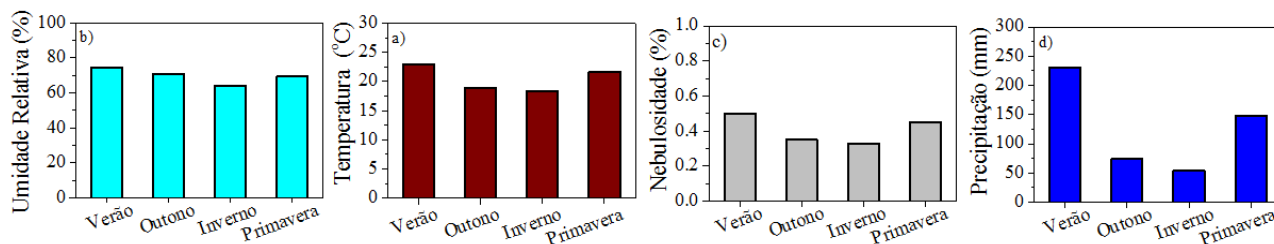


Figura 2: Séries climáticas sazonais da temperatura (a), umidade (b), nebulosidade (c), precipitação (d) do período de 1983 a 2013 em Botucatu.

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. A evolução sazonal da nebulosidade segue a variação da série climática da temperatura sendo mais elevada no verão ( $f = 0.51 \pm 0.10$ ) e menor no inverno ( $f = 0.33 \pm 0.07$ ) Fig. 2c. A nebulosidade na primavera ( $f = 0.48 \pm 0.03$ ) é superior a do outono ( $f = 0.36 \pm 0.07$ ).

A evolução sazonal da precipitação segue as evoluções da temperatura e da nebulosidade Fig. 2d. 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, de outubro a março (primavera e verão), a precipitação é de natureza microclimática originada do processo de convecção livre e macro climático originadas dos eventos meteorológicos como Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e os Sistemas Frontais do Atlântico Sul. O ZCAS atua desde a Bacia Amazônica até o oceano Atlântico Sul, como resultado da convergência de massas de ar quente e úmido oriundas da Bacia Amazônica e do oceano Atlântico Sul. O ZCAS gera aumento da nebulosidade e ocorrência de chuvas intensas e persistentes entre a primavera e verão (Carvalho et al., 2004).

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. A frequência média das entradas de frentes frias é de cinco (5) eventos por mês (Satyamurty et al., 1998; Lemos e Calbete 1996). A maior precipitação ocorre no verão com média total de  $212.51 \pm 83.83$  mm e a mínima no inverno com  $50.27 \pm 17.70$  mm. A precipitação na primavera,  $139.91 \pm 49.20$  mm, é superior a do outono com  $57.75 \pm 18.35$  mm.

A cidade de Botucatu com 140 mil habitantes aproximadamente não possui grandes indústrias poluidoras, mas está inserida em uma região rural de cultivo da cana-de-açúcar e produção de álcool. Ainda na estação do inverno, período da seca, e na primavera, período úmido, a atmosfera local apresenta elevada concentração de materiais particulados provenientes das queimadas da cana de açúcar local Fig. 3a e b e das queimadas e incêndios florestais de outros locais na região central do Brasil (Teramoto et al., 2013; Santos e Escobedo, 2016). O efeito de materiais particulados pode ser decisivo no padrão de redistribuição planetária de energia dos trópicos para latitudes médias e altas altitudes através de processos de transporte convectivo (Freitas et al., 2005), resultando em mudanças no ciclo hidrológico.

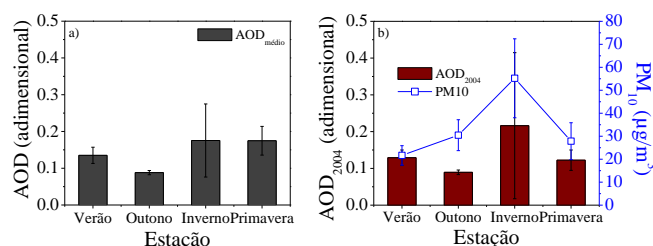


Figura 3. a) Evolução anual da profundidade óptica de aerossóis AOD médias mensais (obtidas do satélite TERRA) no ano de 2001 a 2006. b) Relação entre AOD e a concentração de materiais particulados  $\text{PM}_{10}$  em  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  para 2004.

Em anos onde há o enfraquecimento do período chuvoso na região Central e Norte do Brasil, a prática dos incêndios se intensifica no mês de outubro e pode se estender até novembro (Holben et al., 2001). A queima de biomassa gera aerossóis do tipo fino (diâmetro  $< 2,5 \mu\text{m}$ ), que por meio de correntes convectivas são capazes de percorrer distâncias superiores a 1000 km e permanecer em suspensão na atmosfera durante vários dias (Jacobson, 2002). A evolução sazonal das médias sazonais da AOD (profundidade óptica de aerossóis) obtidas pelo satélite Terra, do período de 2001 a 2006 (Santos e Escobedo, 2016), 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  $\text{PM}_{10}$  de  $70,0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  (Codato et al., 2008).

## 2.2. Medidas das irradiâncias global e difusa dos espectros total e infravermelho

As medidas das irradiâncias global e difusa dos espectros total e infravermelho foram realizadas nos anos de 2003 a 2006. São considerados dias da base de dados quando as irradiâncias global do espectro total e infravermelho ( $I^G$  e  $I^G_{NIR}$ ) e as irradiâncias difusas ( $I^d$  e  $I^d_{NIR}$ ) foram medidas simultaneamente. Ao longo dos 4 anos houveram perdas de muitos dias medidos nos períodos chuvosos, por problemas elétricos no sistema de aquisição de dados, reduzindo a base de dados em torno de 15,4%, de 1460 dias para 1235 dias.

As irradiâncias global dos dois espectros ( $I^G$  e  $I^G_{NIR}$ ) foram medidas por dois piranômetros Eppley PSP com cúpulas de transmissividade nos comprimentos de onda de 0,285 a 3,0 $\mu$ m e 0,70 a 3,0 $\mu$ m, respectivamente. As irradiâncias difusas ( $I^d$  e  $I^d_{NIR}$ ) foram monitoradas por dois piranômetros Eppley PSP com cúpulas de transmissividade nos comprimentos de onda de 0,285 a 3,0 $\mu$ m e 0,70 a 3,0 $\mu$ m respectivamente, utilizando anéis de sombreamento tipo MEO (Melo e Escobedo, 1994) nas seguintes especificações: 80cm de diâmetro, 10cm de largura e 1mm de espessura. Por sugestão do fabricante, o fator de calibração dos piranômetros NIR é multiplicado por um fator de 0,92 para corrigir o efeito da transmissão da cúpula no elemento sensível do instrumento.

Os valores das irradiações difusa total e difusa NIR passaram por correções isotrópicas (FC), para compensar a parcela de irradiação difusa obstruída pelo próprio anel de sombreamento, os quais dependem de parâmetros geométricos como: largura e diâmetro, latitude, geográfico como a latitude e astronômico como a declinação solar. O fator de correção isotrópico (CF) usado para compensar as irradiações difusa total e difusa infravermelha foram calculados pela expressão:

$$CF = \left[ 1 - \left( \frac{H^d}{H^d} \right) \right]^{-1} \quad (1)$$

onde,  $H^d$  ou  $H^d_{NIR}$  são as irradiações difusas, enquanto que  $H'^d$  ou  $H'^d_{NIR}$  são as irradiações difusas interceptadas durante o dia pelo anel de sombreamento. A razão ( $H'^d / H^d$ ) ou ( $H'^d_{NIR} / H^d_{NIR}$ ) foram calculadas pela Eq. (2) proposta por Oliveira et al., (2002):

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

onde b e R são a largura e raio do anel,  $\delta$  é a declinação solar,  $\phi$  é a latitude, z é o ângulo zenital e  $\omega$  é o ângulo horário do sol, variando do nascer até o pôr do sol.

Não foi realizada neste trabalho, uma segunda correção, também necessária na medida da difusa pelo anel de sombreamento, que é devido aos efeitos da cobertura nebulosa e da anisotropia. O efeito da nebulosidade na cobertura de céu aumenta os valores de  $I^G_{NIR}$ ,  $I^d_{NIR}$  enquanto que o efeito da anisotropia diminui os valores de  $I^G_{NIR}$ , e  $I^d_{NIR}$  no sentido crescente de céu parcialmente nublado para céu aberto. A imprecisão das medidas pelos piranômetros PSP da Eppley, é da ordem de 4,1% (Reda, 2008). A imprecisão da medida da difusa pelo piranômetros no anel de sombreamento é da ordem de 8,7% dado por: 4,1% pelo piranometro PSP da Eppley e 4,6% do efeito anisotropico para cobertura total de céu (Dal Pai et al., 2011, 2014). Assim as irradiâncias direta e direta infravermelha obtida pelo método da diferença por meio das equações possuem uma incerteza estimada na ordem de  $\approx 12,8\%$ :

$$I^D = I^G - I^d \quad (3)$$

$$I^D_{NIR} = I^G_{NIR} - I^d_{NIR} \quad (4)$$

Na aquisição dos dados, foi utilizado um Datalogger Campbell 23X, operando na frequência de 1 Hz e armazenando médias de 5 minutos. Os dados de irradiâncias ( $I^G$ ,  $I^d$ ,  $I^D$  e  $I^G_{NIR}$ ,  $I^d_{NIR}$ ,  $I^D_{NIR}$ ) passaram por um controle de qualidade onde foram eliminados os valores espúrios, e numa segunda etapa, foram processados as integrações diária das irradiações:  $H^G$ ,  $H^d$ ,  $H^D$  e  $H^G_{NIR}$ ,  $H^d_{NIR}$  e  $H^D_{NIR}$  (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).

## 2.3. Validações das equações de estimativas

Na validação das equações de estimativas obtidas neste trabalho, foi utilizada uma base de dados de um ano das frações global e difusa (diária) aqui denominada por ano atípico. A seleção foi efetuada a partir da base de dados total

dos 4 anos através de análise estatística onde se comparou para cada mês do ano, o valor da irradiação média-inter anos considerando o intervalo de variação do desvio padrão da média, com o valor da irradiação média de cada ano. Selecionou-se o valor das irradiações médias do ano mais afastados dos valores das irradiações médias inter-anos. Os resultados obtidos estão mostrado na Tab.1

Tabela 1. Ano atípico da base de dados total (2003 – 2006) para as irradiações Global ( $H^G$ ) e Difusa ( $H^d$ ).

| Ano / mês - Atípico |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|---------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                     | Jan  | Fev  | Mar  | Abr  | Mai  | Jun  | Jul  | Ago  | Set  | Out  | Nov  | Dez  |
| $H^G$               | 2003 | 2003 | 2006 | 2004 | 2004 | 2003 | 2006 | 2004 | 2005 | 2005 | 2003 | 2006 |
| $H^d$               | 2004 | 2006 | 2006 | 2004 | 2004 | 2004 | 2006 | 2006 | 2005 | 2003 | 2004 | 2006 |

## 2.4. Indicativos Estatísticos.

Os indicativos estatísticos MBE (Mean Bias Error) e RMSE (Root Mean Square Error) empregados na avaliação do desempenho das equações de estimativa diária das irradiações global, difusa e direta infravermelha foram:

$$MBE(\%) = \frac{100}{X} \times \frac{\sum_{i=1}^X (H_E - H_M)}{X} \quad (5)$$

$$RMSE(\%) = \frac{100}{X} \times \left[ \frac{\sum_{i=1}^X (H_E - H_M)^2}{X} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

onde:  $H_E$  representa os valores estimados,  $H_M$  os valores medidos,  $\bar{H}_M$  representa a média de  $H_M$  e  $\bar{H}_E$  a média dos valores estimados.  $(\bar{X} = \frac{1}{X} \sum_{i=1}^X H_M)$  é o valor médio da medida e X o número de observações. Valores negativos

de MBE indicam subestimativa das equações e vice-versa, quanto menor o valor absoluto de MBE, melhor é o desempenho das equações (Stone, 1993). O RMSE é a raiz quadrada do erro quadrático médio e representa o valor real do erro produzido pelas equações. Em geral, quanto menores os valores obtidos para RMSE, melhor desempenho das equações de estimativas. Recomendações quantitativas são por vezes usadas para validação de modelos: MBE dentro de  $\pm 10\%$  e RMSE  $< 20\%$ , que indica bom ajuste entre as estimativas por modelos e as medidas na superfície (Badescu et al., 2013).

## 3. RESULTADO

### 3.1. Correlações das frações $K_{NIR}^G$ , $K_{NIR}^d$ e $K_{NIR}^D$ em função de Kt

Para melhor ilustrar a dependência das frações  $K_{NIR}^G$ ,  $K_{NIR}^d$  e  $K_{NIR}^D$  dos constituintes atmosféricos nuvens, vapor de água e aerossóis, a Fig. 4a, b e c, mostram as correlações entre os valores de  $K_{NIR}^G$ ,  $K_{NIR}^d$  e  $K_{NIR}^D$  em função de Kt, respectivamente. O espalhamento das correlações para as três radiações é bastante elevado, nas quais para cada valor de Kt há um largo intervalo de variação nos valores  $K_{NIR}^G$ ,  $K_{NIR}^d$  e  $K_{NIR}^D$ , respectivamente. O espalhamento ocorre porque existe uma grande variabilidade das concentrações de nuvens, vapor de água e aerossóis na atmosfera que absorvem e espalham as radiações diferentemente com maior ou menor intensidade nas quatro estações do ano, para mesmos valores de Kt.

A Fig. 4a mostra que existe uma pequena correlação ( $r = 0,55$ ) entre  $K_{NIR}^G$  e Kt, com valores de  $K_{NIR}^G$  crescentes lentamente no sentido do aumento de Kt. Os valores de  $K_{NIR}^G$  crescem em sequência das coberturas de céu nebuloso, parcialmente nublado e aberto. A reta obtida por regressão linear ( $y = 0,408 + 0,09x$ ) possui baixo coeficiente angular, e mostra que a variação da cobertura de céu tem pouca influência na variação de  $K_{NIR}^G$ . A fração  $K_{NIR}^G$  variou de 41% a 48% no intervalo de variação de Kt entre 0, 15 a 0,78. Os menores valores de  $K_{NIR}^G$  ocorrem na cobertura nebulosa ( $Kt < 0,35$ ) porque o vapor de água absorve mais  $H_{NIR}^G$  que  $H^G$  diminuindo o valor da fração  $K_{NIR}^G$  (Martinez-Lozano, 1999). Por outro lado, na cobertura de céu aberto, na qual é alta a concentração de aerossóis, os valores de  $K_{NIR}^G$  são maiores que nas demais coberturas porque a atenuação é maior para  $H^G$  do que para  $H_{NIR}^G$ . O espalhamento não proporcional na cobertura de céu claro por aerossóis deve-se ao fato que comprimentos de onda curtos são preferencialmente extintos (Alados e Arboledas 1999). Ao contrário de  $K_{NIR}^G$  e Kt, a relação  $K_{NIR}^d$  e Kt, Fig. 4 b, é polinomial e existe uma correlação ( $r = 0,738$ ) mais significativa estatisticamente que  $K_{NIR}^G \times Kt$ . Os valores de  $K_{NIR}^d$  decrescem no sentido do aumento de Kt, ou os valores de  $K_{NIR}^d$  diminuem lentamente quando decrescem as

concentrações de nuvens e o vapor de água na atmosfera entre  $0 < Kt < 0,65$ , e decresce rapidamente quando aumenta a concentração de aerossóis na atmosfera para  $Kt > 0,65$ .

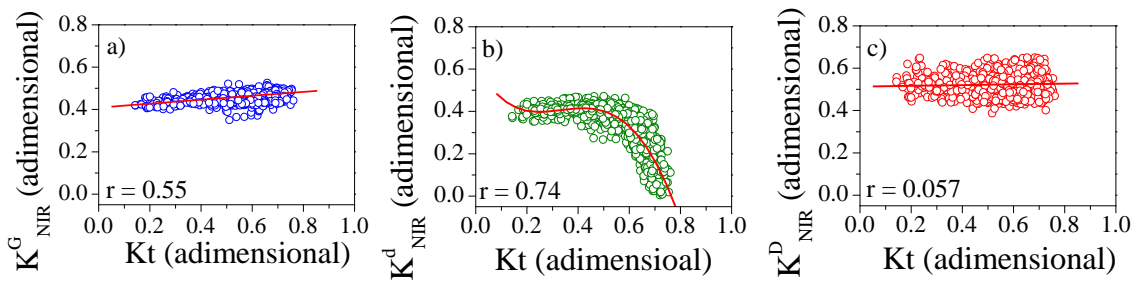


Figura 4. Correlações das frações  $K_{NIR}^G$  (a),  $K_{NIR}^d$  (b) e  $K_{NIR}^D$  (c) em função de  $Kt$ .

O valor de  $K_{NIR}^d$  é maior na cobertura de céu nebulosa e úmida, porque o espalhamento de  $H_{NIR}^d$  e  $H^d$  é desproporcional, as gotículas de água das nuvens espalham mais  $H_{NIR}^d$  nos comprimentos longos que  $H^d$  aumentando o valor da fração  $K_{NIR}^d$ . Por outro lado, os valores das  $K_{NIR}^d$  são menores nas estações de baixa nebulosidade, seca e com aerossóis, por que o espalhamento de  $H_{NIR}^d$  e  $H^d$  por aerossóis é desproporcional, é maior para  $H^d$  nos comprimentos curtos que para  $H_{NIR}^d$  decrescendo o valor de  $K_{NIR}^d$ . A Fig. 4 c mostra que não existe correlação ( $r = 0,057$ ) entre  $K_{NIR}^D$  e  $Kt$ . Os valores de  $K_{NIR}^D$  permanecem constantes em função do aumento de  $Kt$ . A reta obtida por regressão linear ( $y = 0,516 + 0,09x$ ) possui baixo coeficiente angular, e mostra que a variação da cobertura de céu também possui pouca influencia na variação de  $K_{NIR}^D$ . A falta de correlação entre  $K_{NIR}^G$ ,  $K_{NIR}^d$  e  $K_{NIR}^D$  em função de  $Kt$ , respectivamente, sugere neste estudo a proposta de um modelo estatístico alternativo que permita atingir correlações mais significativas estatisticamente entre as frações  $K_{NIR}^G$  e  $K_{NIR}^d$  em função de  $Kt$ . Foi descartada a continuidade sobre a correlação da fração média de  $\bar{K}_{NIR}^D \times Kt$ , porque  $K_{NIR}^D$  não apresentou variações em função de  $Kt$ .

### 3.2. Equações de estimativas das frações médias $\bar{K}_{NIR}^G$ e $\bar{K}_{NIR}^d$ em função de $Kt$

No modelo estatístico alternativo proposto, as variações de  $K_{NIR}^G$  e  $K_{NIR}^d$  em função de  $Kt$  (Fig. 4 a e b), são substituídas por variações dos valores médios de  $\bar{K}_{NIR}^G$  Fig. 5 a e b, e  $\bar{K}_{NIR}^d$ , Fig 6 a, b e c, em funções de intervalos discretos centesimais de  $Kt$ . Essa técnica foi usada em vários estudos com a radiação difusa (Orgill e Hollands, 1977; Bartoli et al., 1982; Erbs et al., 1982). No modelo alternativo, o intervalo de variação de  $Kt$  foi subdividido em 100 subintervalos, onde  $(Kt)_i$  representa o subintervalo  $i$  (de 0,01 em 0,01 unidades) de  $Kt$ . Em cada subintervalo  $(Kt)_i$  calculou-se o valor médio  $\bar{K}_{NIR}^G$  e  $\bar{K}_{NIR}^d$  onde os alteres representam os respectivos desvios  $\delta K_{NIR}^G$  e  $\delta K_{NIR}^d$ , como mostrado na Fig. 5 c e na Fig. 6 c.

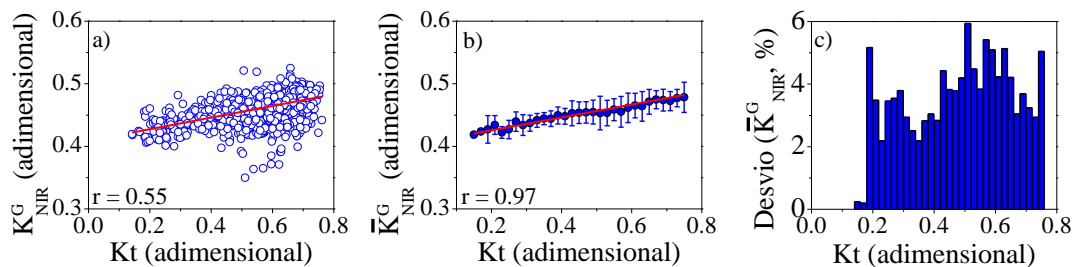


Figura 5. Correlações a)  $K_{NIR}^G$  em função de  $Kt$ ; b)  $\bar{K}_{NIR}^G$  em função de  $Kt$ , e c) valores de  $\delta K_{NIR}^G$  em função de  $Kt$ .

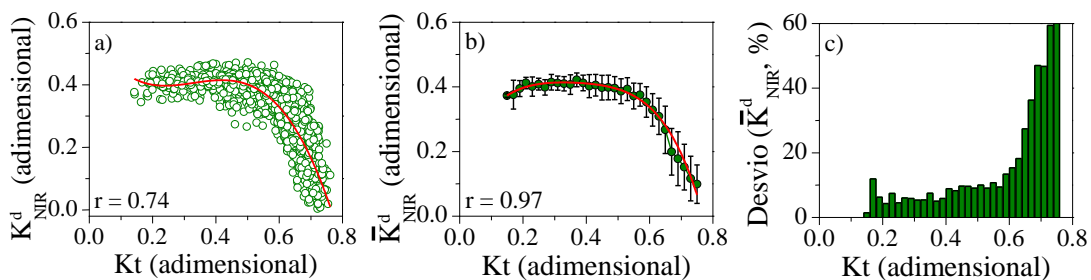


Figura 6. Correlações a)  $K_{NIR}^d$  em função de  $Kt$ ; b)  $\bar{K}_{NIR}^d$  em função de  $Kt$ ; c) valores de  $\delta K_{NIR}^d$  em função de  $Kt$ .

Assim as correlações dos valores de  $\bar{K}_{\text{NIR}}^{\text{G}}$  em função de  $Kt$  e dos valores de  $\bar{K}_{\text{NIR}}^{\text{d}}$  em função de  $Kt$ , são do tipo linear e polinomial, ambas com elevados coeficientes de correlações ( $r = 0,979$  e  $r = 0,971$ ), respectivamente. As equações obtidas são apresentadas por meio das Eq. (7) e Eq. (8) com seus respectivos coeficientes de determinação, Eq. (7)  $R^2 = 0.958$  e Eq. (8)  $R^2 = 0.960$

$$\bar{K}_{\text{NIR}}^{\text{G}} = 0.408 + 0.092Kt \quad (7)$$

$$\bar{K}_{\text{NIR}}^{\text{d}} = 0.324 + 0.518Kt - 1.37Kt^2 + 3.058Kt^3 - 3.68Kt^4 \quad (8)$$

Os elevados coeficientes de determinação, próximos a 1 mostram que os valores  $\bar{K}_{\text{NIR}}^{\text{G}}$  e  $\bar{K}_{\text{NIR}}^{\text{d}}$  estão correlacionadas em cada intervalo de  $Kt$  entre 0,15 a 0,75. Os valores  $\delta K_{\text{NIR}}^{\text{G}}$  (Fig 5c) e  $\delta K_{\text{NIR}}^{\text{d}}$  (Fig 6c) expressam a amplitude de variação de  $\bar{K}_{\text{NIR}}^{\text{G}}$  e  $\bar{K}_{\text{NIR}}^{\text{d}}$  devido as variações de concentrações das nuvens, vapor de água e aerossóis, em cada intervalo centesimal de  $Kt$ . O valor de  $\delta K_{\text{NIR}}^{\text{G}}$  variou em até 6,0%, sem uma tendência definida, com  $Kt$  variando entre 0,15 a 0,75, ou seja, a amplitude variação  $K_{\text{NIR}}^{\text{G}}$  não dependeu das variações de cobertura de céu. Há valores de  $\delta K_{\text{NIR}}^{\text{G}}$  acima 5,0% e abaixo de 3,0% nas mesmas coberturas de céu: nublada, parcialmente nublada e aberta. Os resultados mostram que a Eq. (7) pode ser utilizada na estimativa de  $\bar{K}_{\text{NIR}}^{\text{G}}$  com elevado coeficiente de determinação, e que a incerteza da estimativa depende do valor de  $Kt$ , podendo variar entre 2% a 6,0% em função da variação da cobertura de céu entre céu nebuloso a aberto.

Diferentemente de  $\delta \bar{K}_{\text{NIR}}^{\text{G}}$ , o valor de  $\delta \bar{K}_{\text{NIR}}^{\text{d}}$  variou em função da variação da cobertura de céu com tendência definida. Ou seja, para uma variação de  $Kt$  entre 0 e 0,75, o valor de  $\bar{K}_{\text{NIR}}^{\text{d}}$  cresceu exponencialmente no sentido crescente de  $Kt$ , aumentando consideravelmente da cobertura de céu nublada ( $Kt < 0,35$ ) com valor de 7% até a cobertura de céu aberta ( $Kt > 0,65$ ), em que  $\delta \bar{K}_{\text{NIR}}^{\text{d}}$  atingiu valores da ordem de 60,0%. A larga variação de  $\bar{K}_{\text{NIR}}^{\text{d}}$  na cobertura de céu aberto está associada aos efeitos da anisotropia da radiação difusa, devido a variação da concentração de aerossóis, não foram considerados sobre as correções na medida da radiação difusa isotrópica pela Eq.(1). O resultado mostra que a Eq. (8) pode ser utilizada na estimativa de  $\bar{K}_{\text{NIR}}^{\text{d}}$  com elevado coeficiente de determinação  $R^2 = 0.960$  e com incertezas variando entre 5,0% a 60,0%, dependendo do valor de  $Kt$ .

A Fig. 7a e 7b mostra as correlações obtidas na validação, comparação entre estimativa de  $\bar{K}_{\text{NIR}}^{\text{G}}$  e  $\bar{K}_{\text{NIR}}^{\text{d}}$  por meio das equações (7 e 8) e a medidas de  $\bar{K}_{\text{NIR}}^{\text{G}}$  e  $\bar{K}_{\text{NIR}}^{\text{d}}$  do ano atípico.

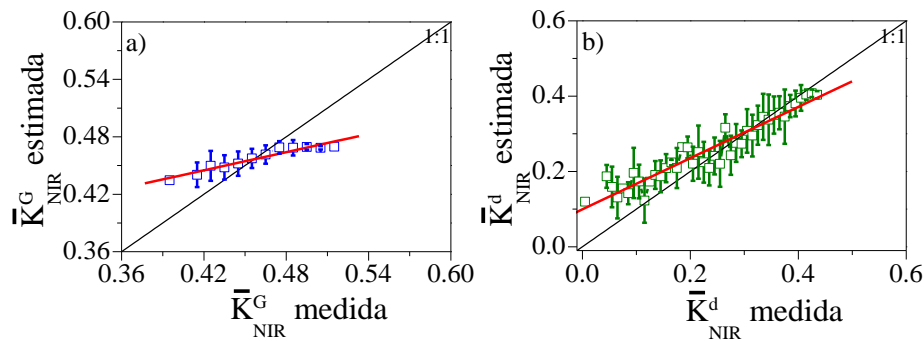


Figura 7. Comparação entre os valores estimados e medidos para o ano atípico de: a)  $\bar{K}_{\text{NIR}}^{\text{G}}$  e b)  $\bar{K}_{\text{NIR}}^{\text{d}}$ .

As correlações são lineares nos intervalos de variação de  $K_{\text{NIR}}^{\text{G}}$  e  $K_{\text{NIR}}^{\text{d}}$  e os coeficientes de correlação ( $r$ ):  $r_{\text{NIR}}^{\text{G}} = 0.961$ ,  $r_{\text{NIR}}^{\text{d}} = 0.953$  mostram que as estimativas e as medidas, próximo de 1 estão bem correlacionadas estatisticamente. As Eq.(7) e Eq. (8) foram também validadas comparando os valores de  $\bar{K}_{\text{NIR}}^{\text{G}}$  e  $\bar{K}_{\text{NIR}}^{\text{d}}$  estimadas e medidas do ano atípico por meio dos indicativos estatísticos MBE e RMSE. Para a Eq. (7) os valores obtidos para MBE e RMSE foram de 2,8% e 3,8%, respectivamente, enquanto que para a Eq. (8) os valores obtidos para MBE e RMSE foram de 1,0% e 13,7% respectivamente. Uma escala classificatória para os diferentes intervalos de RMSE segundo (Jamieson et al., 1991; Li et al., 2013) o desempenho dos modelos foram: Excelente para  $K_{\text{NIR}}^{\text{G}}$  (RMSE < 10%) e bom para  $\bar{K}_{\text{NIR}}^{\text{d}}$  (RMSE  $\geq 30$ ). Desta forma, o modelo estatístico proposto por meio dos valores médios de  $\bar{K}_{\text{NIR}}^{\text{G}}$  e  $\bar{K}_{\text{NIR}}^{\text{d}}$  em função de  $Kt$ , podem ser usadas com exatidão e precisão nas estimativas de  $\bar{K}_{\text{NIR}}^{\text{G}}$  e  $\bar{K}_{\text{NIR}}^{\text{d}}$ .

### 3.3. Equações de estimativas da fração média $\bar{K}_{\text{NIR}}^{\text{d}}$ em função de $K^{\text{d}}$

Para locais onde a radiação difusa é monitorada de rotina, outro modelo alternativo para a estimativa  $\bar{K}_{\text{NIR}}^{\text{d}}$  no modelo estatístico anterior é proposto, tendo como variável de entrada a radiação difusa, ou seja, trocando  $Kt$  por  $K^{\text{d}}$ . A Fig. 8a mostra a correlação entre os valores de  $K_{\text{NIR}}^{\text{d}}$  em função de  $K^{\text{d}}$ . Similarmente, as correlações  $K_{\text{NIR}}^{\text{G}}$ ,  $K_{\text{NIR}}^{\text{d}}$  e  $K_{\text{NIR}}^{\text{d}}$  em função de  $Kt$ , a dispersão de  $K_{\text{NIR}}^{\text{d}}$  em função de  $K^{\text{d}}$  é também muito elevada. Para cada valor de  $K^{\text{d}}$  há um largo intervalo nos valores  $K_{\text{NIR}}^{\text{d}}$  devido a variabilidade atmosférica das concentrações de nuvens, vapor de água e

aerossóis ao longo dos anos. A correlação  $\bar{K}_{NIR}^d$  em função de  $K^d$ , Fig. 8b, aumenta exponencialmente no intervalo de variação de  $K^d$  entre 0 e 1 ou no sentido que a cobertura do céu varia de aberto a nebuloso.

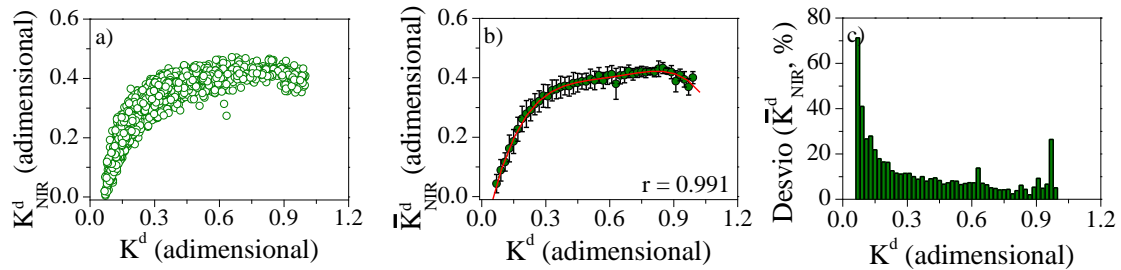


Figura 8. Correlações a)  $K_{NIR}^d$  em função de  $K^d$ , e b)  $\bar{K}_{NIR}^d$  em função de  $K^d$  e c)  $\delta K_{NIR}^d$  em função de  $K^d$ .

A correlação dos valores de  $\bar{K}_{NIR}^d$  em função de  $K^d$ , Fig. 8b é do tipo polinomial de quarta ordem, com elevado coeficiente de correlação ( $r = 0,991$ ). A equação de regressão obtida com respectivo coeficiente de determinação  $R^2 = 0,982$  foi.

$$\bar{K}_{NIR}^d = -0.166 + 3.49K^d - 0.44(K^d)^2 + 9.28(K^d)^3 - 3.80(K^d)^4 \quad (9)$$

O coeficiente de determinação  $R^2$  próximo de 1 mostra que  $\bar{K}_{NIR}^d$  está muito bem correlacionada em cada intervalo de  $K^d$  entre 0,05 a 1,0.

A Fig. 9 mostra a correlação obtida na validação, comparação entre estimativa de  $\bar{K}_{NIR}^d$  por meio da Eq (9) e a medida de  $K_{NIR}^d$  do ano atípico. A correlação entre os valores estimados e medidos estão em concordância com a curva ideal de 45° no ajuste, e é linear no intervalo de variação das medidas de  $H_{NIR}^d$ . O valor do coeficiente de correlação  $r_{NIR}^d = 0.951$  próximo de 1, indica que as estimativas da equação e a medidas estão estatisticamente muito bem correlacionadas.

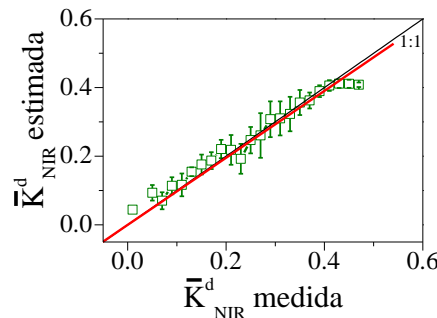


Figura 9. Comparação entre os valores estimados pela Eq. (7) e medidos para o ano atípico de  $\bar{K}_{NIR}^d$ .

Os valores dos indicadores  $MBE = 0,5\%$ ,  $RMSE = 10,7\%$  mostram que os resultados foram significativos estatisticamente: a Eq.(9) subestima a medida com pequeno erro e baixo espalhamento. O resultado mostra que a Eq (9), pode ser utilizada na estimativa da fração  $\bar{K}_{NIR}^d$  a partir de  $K^d$  com precisão e exatidão. De acordo com a classificação de (Jamieson et al., 1991; Li et al., 2013), o desempenho do modelo proposto é bom ( $10\% \leq RMSE < 20\%$ ) nas estimativas da fração  $\bar{K}_{NIR}^d$  a partir de  $K^d$ .

#### 4. CONCLUSÃO

Análise por meio de regressões simples mostrou que os valores  $K_{NIR}^G$ ,  $K_{NIR}^d$  e  $K_{NIR}^D$  estão fracamente correlacionadas com  $K_t$ , e nenhuma correlação entre valores de  $K_{NIR}^D$  em função de  $K_t$ . No entanto, os valores médios de  $\bar{K}_{NIR}^G$  e  $\bar{K}_{NIR}^d$  apresentaram elevadas correlações: linear para  $(\bar{K}_{NIR}^G \times K_t)$  com  $R^2 = 0,958$  e polinomial para  $(\bar{K}_{NIR}^d \times K_t)$  com  $R^2 = 0,960$ . Similarmente, polinomial para  $(\bar{K}_{NIR}^d \times K^d)$  com  $R^2 = 0,982$ . A validação por meio dos indicadores estatísticos  $MBE$ ,  $RMSE$  mostra que as equações  $(\bar{K}_{NIR}^G \times K_t)$  e  $(\bar{K}_{NIR}^d \times K_t)$  podem ser utilizadas com precisão e exatidão nas estimativas de  $\bar{K}_{NIR}^G$  ( $MBE = 2,8\%$  e  $RMSE = 3,8\%$ ) e  $\bar{K}_{NIR}^d$  ( $MBE = 1,0\%$  e  $RMSE = 13,7\%$ ) em função de  $K_t$  respectivamente. Similarmente, a equação  $(\bar{K}_{NIR}^d \times K^d)$  pode ser usada nas estimativas de  $\bar{K}_{NIR}^d$  ( $MBE = 0,5\%$  e  $RMSE = 10,7\%$ ) em função de  $K^d$ .



**Agradecimentos:** A FAPESP, CNPq.

## 5. REFERÊNCIAS

- Alados, I., Alados-Arboledas, L. Direct and diffuse photosynthetically active radiation: measurements and modelling. *Agric. and For. Meteorol.*, v.93, p.27-38, 1999.
- Badescu, V.; Gueymard, C. A.; Cheval, C.; Oprea, C.; Baciu, M.; Dumitrescu, A.; Iacobescu, F.; Milos, I.; Rada, C. Accuracy analysis for fifty-four clear-sky solar radiation models using routine hourly global irradiance measurements in Romania. *Renewable Energy*, v.55, p.85-103, 2013.
- Bartoli, b., Cuomo, v., Amato, u. Diffuse and beam components of daily global radiation in Genova and Macerata. *Sol. Energy*, v.28, p.307-11, 1982.
- Cañada J, Pedros G, Bosca JV. Relationships between UV (0.290-0.385  $\mu\text{m}$ ) and broad band solar radiation hourly values in Valencia and Córdoba, Spain. *Energy* 2003;28:199-217.
- Carrer, D.; Dafont, S.; Roujean, J.-L.; Calvet, J.-C.; Meurey, C.; Le Moigne, P. Incoming Solar and Infrared Radiation Derived from METEOSAT: Impact on the Modeled Land Water and Energy Budget over France. *Journal of Hydrometeorology*, v 13, p.504 – 520, 2012.
- Carvalho L MV, Jones C, Liebmann B. The South Atlantic Convergence Zone: Intensity, Form, Persistence, and Relationships with Intraseasonal to Interannual and Extreme Rainfall. *Journal of Climate* 2004;17:88-108.
- CPA, 2017. Clima dos Municípios Paulistas. Disponível em [http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima\\_muni\\_086.html](http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima_muni_086.html) (Acesso em <17/06/2017>). [In portuguese].
- Chaves M, Escobedo JF. A software to process daily solar radiation data. *Renewable Energy* 2000;19:339-344.
- Codato G, Oliveira AP, Soares J, Escobedo JF, Gomes EG, Dal Pai A. Global and diffuse solar irradiances in urban and rural areas in southeast Brazil. *Theoretical and Applied Climatology* 2008;93:57-73.
- Dal Pai A, Escobedo JF, Correa FH. Numerical correction for the diffuse solar irradiance by the Melo-Escobedo shadowing measuring method. In: ISES SOLAR WORLD CONGRESS 2011, Kassel.
- Dal Pai A, Escobedo JF, Dal Pai E, Santos MC. Estimation of Hourly, Daily and Monthly mean Diffuse Radiation Based Shadowing Correction. *Energy Procedia* 2014;57:1150 – 1159.
- Dombrovsky, L. A.; Fedorets, A. A.; Medvedev, D. N. The use of infrared irradiation to stabilize levitating clusters of water droplets. *Infrared Physics & Technology*, v. 75, p.124-132, 2016.
- Erbs, D.G., Klein, S.A., Duffie, J.A. Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation. *Sol. Energy*, v.28, p.293-302, 1982.
- Escobedo JF, Dal Pai A, Oliveira AP, Soares J, Dal Pai E. Diurnal and Annual Evolution of UV, PAR and NIR Irradiations in Botucatu/Brazil. *Energy Procedia* 2014;57:1130-1139.
- Escobedo JF, Gomes E, Oliveira AP, 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* 2009;86:299-309.
- Escobedo JF, Gomes EN, Oliveira AP, Soares JR. Ratios of UV, PAR and NIR components to global solar radiation measured at Botucatu site in Brazil. *Renewable Energy* 2011;36:169-178.
- Freitas, S.R., Longo, K.M., Dias, M.A.F.S., et al., 2005. Monitoring the transport of biomass burning emissions in South America. *Environ. Fluid Mech.* 5, 135 –167.
- Fröhlich C, London J. Revised Instruction manual on radiation instruments and measurements. WCRP Publications series No. 7. WMO/TD No. 149, 1986, October.
- Holben BN, Tanré D, Smirnov A, Eck TF, Slutsker I, et al. An emerging ground-based aerosol climatology: Aerosol optical depth from AERONET. *Journal of Geophysical Research* 2001;106:12.067-12.097.
- Jacobson MZ. Analysis of aerosol interactions with numerical techniques for solving coagulation, nucleation, condensation, dissolution and reversible chemistry among multiple size distributions. *Journal of Geophysical Research* 2002;107:1-23.
- Jamieson PD, Porter JR, Wilson DR. A test of the computer simulation model ARC-WHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. *Field Crops Res* 1991;27:337-50.
- Kume, A.; Nasahara, K. N.; Nagai, S.; Muraoka, H. The ratio of transmitted near-infrared radiation to photosynthetically active radiation (PAR) increases in proportion to the adsorbed PAR in the canopy. *J Plant Res*, v.124, p.99-106, 2011.
- Lamnatou, C.; Chemisana, D. Solar radiation manipulations and their role in greenhouse claddings: Fresnel lenses, NIR- and UV-blocking materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2013;18:271-287.
- Larsen N F, Stamnes K. Use of shadows to retrieve water vapor in hazy atmospheres. *Applied Optics* 2005;44:6986-94.
- Lemos CF, Calbete NO. Sistemas frontais que atuaram no litoral de 1987-1995. *Climanálise*, Edição comemorativa 10 anos, 1996. (INPE-10717-PRE/6178). [in portuguese].
- Li, M., Tang, X., Wu, W., et al., 2013. General models for estimating daily global solar radiation for different solar radiation zones in mainland China. *Energy Convers. Manag.* 70, 139-148.
- 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 JMD, Escobedo JF. Medida da radiação solar difusa. VII Congresso Ibérico de Energia Solar, Vigo, Espanha. Anais do Internacional Solar Energy Society, 1994.
- Nogués-Paegle J, Mo KC. Alternating wet and dry conditions over South America during summer. *Mon Wea Rev* 1997;125:279-291.
- Oliveira AP, Escobedo JF, Machado AJ. A new shadow-ring device for measuring diffuse solar radiation at surface. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 2002;5:698-708.
- Orgill, J. F., Hollands, K. G. T. Correlation equation for hourly diffuse radiation on a horizontal surface. *Solar Energy*, v.19, n.3, p.357-359, 1977.
- Radel, G.; Shinea, K. P.; Ptashnika, I. V. Global radiative and climate effect of the water vapour continuum at visible and near-infrared wavelengths. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* v. 141, p.727–738, 2015.
- Reda IM, Myers DR, Stoffel TL. Uncertainty Estimate for the Outdoor Calibration of Solar Pyranometers: NCSLI Measure, *The Journal of Measurement Science* 2008;3:58-66.
- Rossi, T. J. ; ESCOBEDO, J. F. ; Santos, C. M. ; Silva, M. B. P. ; GOMES, E. N. . Equações de estimativas sazonais para as radiações global, difusa e direta infravermelha em Botucatu/SP/Brasil. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, v. 19, p. 11.55-11.66, 2015.
- Rossi, T. J. ; Rossi, L. R. ; Santos, C. M. ; Silva, M. B. P. ; Escobedo, João F. . DEPENDÊNCIA DA COBERTURA DE CÉU NAS FRAÇÕES SOLARES GLOBAL, DIFUSA E DIRETA DO ESPECTRO INFRAVERMELHO EM BOTUCATU/SP/BRASIL. *Revista Brasileira de Energia Solar*, v. VII, p. 40-49, 2016.
- Salatiel, S.; Coulomb, B.; Lebreton, C.; Dubertret, L. Non-coherent near infrared radiation protects normal human dermal fibroblasts from solar ultraviolet toxicity. *The Journal of Investigative Dermatology*, v.111, p.629-633 , 1998.
- Santos CM, Escobedo JF. Temporal variability of atmospheric turbidity and DNI attenuation in the sugarcane region, Botucatu/SP. *Atmospheric Research* 2016;181:312–321.
- Satyamurty P, Nobre CA, Silva Dias PL. Topics: South America. *Meteorological Monographs* 1998;27:119-139.
- Sonneveld, P. J.; Swinkels, G. L. A. M.; Bot, G. P. A.; Flamand, G. Feasibility study for combining cooling and high grade energy production in a solar greenhouse. *Biosystems Engineering*, v.105, p.51–8, 2010a.
- Sonneveld, P. J.; Swinkels, G. L. A. M.; Campen, J.; Baj, V. T.; Janssen, H. J. J.; Bot, G. P. A. Performance results of a solar greenhouse combining electrical and thermal energy production. *Biosystems Engineering*, v.106, p.48–57, 2010b.
- Stone RJ. Improved statistical procedure for the evaluation of solar radiation estimation models. *Solar Energy* 1993;51:289-91.
- Teramoto ET, Escobedo JF, Dal Pai A, Santos CM, Fukunaga LA, Silva MBP. Influência de nuvens, aerossóis e ozônio sobre o KTUV em Botucatu/SP/Brasil: cidade produtora de cana-de-açúcar. *Energías Renovables y Medio Ambiente* 2013;1:11.151-11.160. [in portuguese].
- Willmott CJ. On the validation of models. *Physical Geography* 1981;2:184-194.

## ESTIMATES OF GLOBAL ( $\bar{K}_{\text{NIR}}^{\text{G}}$ ) AND DIFFUSE ( $\bar{K}_{\text{NIR}}^{\text{d}}$ ) INFRARED SOLAR FRACTIONS AS A FUNCTION OF $K_{\text{t}}$ AND $K_{\text{d}}$ FRACTIONS OF TOTAL SPECTRUM.

**Abstract.** This study presents the collection and validation of estimation equations for global solar fractions ( $\bar{K}_{\text{NIR}}^{\text{G}}$ ), diffuse ( $\bar{K}_{\text{NIR}}^{\text{d}}$ ) of the infrared spectrum as a function of the solar fractions  $K_{\text{t}}$  and  $K_{\text{d}}$  of the total spectrum. The radiation database was measured between 2003 and 2006 in Botucatu / SP / Brazil. In the proposed statistical model, the average values of  $\bar{K}_{\text{NIR}}^{\text{G}}$  and  $\bar{K}_{\text{NIR}}^{\text{d}}$  were determined as a function of  $K_{\text{t}}$  by means of linear and polynomial regression, respectively. Similarly, the average values of  $\bar{K}_{\text{NIR}}^{\text{d}}$  were equated as a function of  $K_{\text{d}}$  by means of polynomial regression. The coefficient of determination obtained for the correlations as a function of  $K_{\text{t}}$  and  $K_{\text{d}}$  were higher than  $R^2 = 0.9600$ . The statistical indicatives obtained in the validation were  $\bar{K}_{\text{NIR}}^{\text{G}}$  (MBE = 2.8% and RMSE = 3.8%) and  $\bar{K}_{\text{NIR}}^{\text{d}}$  (MBE = 1.0% and RMSE = 13.7%) show that the equations can be used in the estimations of  $\bar{K}_{\text{NIR}}^{\text{G}}$  and  $\bar{K}_{\text{NIR}}^{\text{d}}$  as a function of  $K_{\text{t}}$ , respectively, with precision and accuracy. Similarly,  $\bar{K}_{\text{NIR}}^{\text{d}}$  (MBE = 0.5% and RMSE = 10.7%) in the estimation of  $\bar{K}_{\text{NIR}}^{\text{d}}$  as a function of  $K_{\text{d}}$ .

**Keywords:** Global solar radiation, diffuse and direct, Infrared solar radiation.