



Modelagem das frações solares global (\bar{K}_{NIR}^G) e difusa (\bar{K}_{NIR}^d) do infravermelho em função de frações do espectro solar total

Taiza Juliana Rossi¹, João Francisco Escobedo¹, Cícero Manoel dos Santos^{2(*)} e Maurício Bruno Prado da Silva¹

¹UNESP – Faculdade de Ciências Agrônomicas/Departamento de Engenharia Rural. Av. Universitária, 3780 - Altos do Paraíso, CEP 18610-034 Botucatu, SP. E-mails: taiza.rossi@unesp.br, j.escobedo@unesp.br e mauricio.prado19@hotmail.com.

²Universidade Federal do Pará - Faculdade de Engenharia Agrônômica. Rua Cel. José Porfírio, 2515 - São Sebastião, CEP 68372-040 Altamira, PA.

E-mail: ciceromanoel2007@gmail.com

(*) Autor para correspondência.

INFORMAÇÕES

História do artigo:

Recebido em 23 de dezembro de 2020

Aceito em 26 de junho de 2021

Termos para indexação:

radiação solar global

frações solares

frações espectrais

radiação solar infravermelha

modelos estatísticos

RESUMO

O trabalho descreve a obtenção e a validação de equações para estimar as frações solares global (\bar{K}_{NIR}^G) e difusa (\bar{K}_{NIR}^d) do espectro infravermelho em função das frações solares global (K_t) e difusa (K^d) do espectro total. As medidas das irradiações global e difusa foram do período de 2003 a 2006 em Botucatu/SP/Brasil. Na modelagem estatística, 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 em função de K^d por meio de regressão polinomial. Os índices estatísticos de validação (rMBE e rRMSE) foram utilizados para avaliar o desempenho dos modelos. Os coeficientes de determinação obtidos para as três correlações em função de K_t e K^d foram superiores $R^2 = 0,960$. Os indicadores estatísticos obtidos na validação: \bar{K}_{NIR}^G (rMBE = 2,8% e rRMSE = 3,8%) e \bar{K}_{NIR}^d (rMBE = 1,0% e rRMSE = 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 (rMBE = 0,5% e rRMSE = 10,7%) na estimativa de \bar{K}_{NIR}^d em função de K^d .

© 2021 SBAgrom. Todos os direitos reservados.

Introdução

A radiação solar tem papel importante na sustentação biótica em cada região do planeta. Esta radiação que atinge a superfície da Terra convencionalmente tem comprimento de onda de luz que varia de 300 a 2500 nm. Aproximadamente 5% da radiação solar que atinge a superfície da Terra está na forma de ultravioleta, e cerca de 42% da radiação solar ocorre na região visível, enquanto cerca de 53% da radiação solar total está na região do infravermelho

(Coser et al. 2015). A radiação global infravermelha próximo (NIR), na faixa espectral de 0,70-4,0 μm , tem grande importância como fonte renovável de energia e variação de temperatura, porque representa larga quantidade de energia proveniente do sol (Escobedo et al. 2009 e 2011) e é responsável pelo aquecimento e parcela da iluminação natural de ambientes, entre muitas outras aplicações na superfície da Terra. Assim, o calor é uma consequência direta da radiação infravermelha incidente em um objeto e a região de produção de calor da radiação infravermelha varia

de 700 a 1100 nm (Bendiganavale & Malshe, 2008; Kaur et al. 2012). Como recurso de energia renovável, o estudo da NIR é de importância para sistema de geração fotovoltaica de células solares (Zhao et al. 2019). Segundo, os autores as células solares de perovskitas mostram um início de fotogeração em torno de 800 nm, deixando bastante perda espectral na NIR.

Nas áreas agrônômica e biológica, mesmo que seja pouca absorvida pelas plantas, a NIR é utilizada em simulação do crescimento da planta no estudo da produção de biomassa e previsão da produtividade agrícola. Também é usada na secagem natural de produtos agrícolas e é fundamental no aquecimento interno (em ambientes protegidos, principalmente nos meses frios) para manter as condições térmicas ideais (Lamnatou & Chemisana et al. 2013; Hassanién et al. 2016; Wang et al. 2016). Na saúde, a NIR exerce efeito positivo no metabolismo humano, que é composto de 70% de água e pode potencialmente acumular uma grande quantidade de energia por meio da forte absorção, a qual é usada em processos biológicos (Zhao et al. 2019). No entanto, na ausência de proteção adequada, a NIR também pode induzir vários tipos de danos aos tecidos e doenças, como catarata e fotoenvelhecimento, afetando os tecidos mais profundos do olho, como músculos, lentes e retina (Tanaka & Nakayama, 2016).

Semelhante a outras bandas da irradiância solar, a irradiância NIR ao atingir a superfície da Terra também é dividida em irradiância direta e difusa com sua soma definida como irradiância NIR global. Dentre as faixas espectrais, a NIR é a menos estudada, quando comparada com as radiações Ultravioleta (UV) e a fotossinteticamente ativa (PAR), quer seja por medidas ou por modelos de estimativas, além de haver poucas as informações disponíveis na literatura (Escobedo et al. 2009; Rossi et al. 2015; Rossi et al. 2016). O modelo mais comum é o estatístico, que relaciona as irradiações dos dois espectros (Infravermelho) H_{NIR} e (Total) H , por meio de regressão linear tipo ($H_{NIR} = K_{NIR} \times H$) em que K_{NIR} é a razão ou fração de NIR. Resultados obtidos com as irradiações globais NIR e total mostram que o valor da fração K_{NIR}^G anual (*G indica radiação global), 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 pode variar de 44,0%, na cobertura de céu nublado até 51,5%, na cobertura de céu aberto (Escobedo et al. 2009; Rossi et al. 2015; Rossi et al. 2016).

Similarmente, as correlações entre as irradiações difusas (H_{NIR}^d) e (H^d) (*d indica radiação difusa), bem como entre as irradiações diretas (H_{NIR}^D) e (H^D) (*D indica radiação direta), mostram 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; Rossi et al. 2016). Weiss & Norman (1985) propuseram um modelo para estimar a NIR difusa, a partir de estimativa de NIR direto e obtiveram resultados satisfatórios. Em quatro locais da Tailândia, Thongrasmee et al. (2018), desenvolveram um modelo empírico de estimativa de NIR que relacionada água precipitável, coluna de ozônio total, profundidade óptica do aerossol e índice de nuvem. Os autores obtiveram erros com desempenho próximo das medidas. A NIR foi estimada usando Rede Neural Artificial (RNA) e modelo semi-empírico, utilizando dados de profundidade óptica do aerossol, água precipitável solar e transmissividade atmosférica (Kt) (Pratummasoot et al. 2020). Os autores obtiveram para os modelos ANN e semi-empírico, as estimativas com RNA e semi-empírico com razoável concordância com as medidas.

Diante da necessidade de se conhecer melhor as relações entre as irradiações dos espectros total e NIR, neste trabalho são propostos modelos estatísticos que correlacionam as frações K_{NIR}^G , K_{NIR}^d e K_{NIR}^D com a fração transmitida da irradiação global ($K_t = H^G / H^0$, onde H^G é a irradiação solar global e H^0 a irradiação solar no topo da atmosfera) ou com a fração da irradiação difusa na irradiação global ($K^d = H^d / H^G$) na superfície atmosférica. Os modelos das frações eliminam a dependência do dia e local, permitindo estimativas das irradiações solar NIR em qualquer local de clima similar.

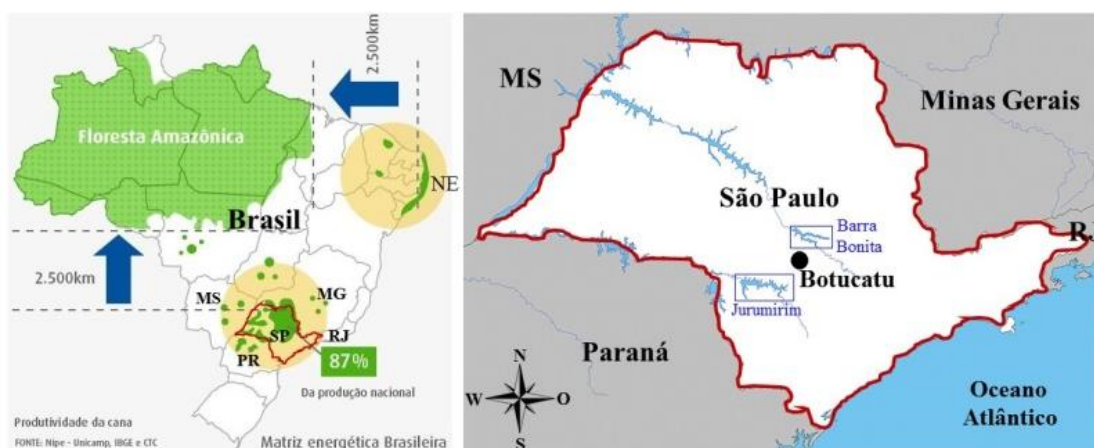
Material e Métodos

Análise climática sazonal local

As medidas foram obtidas da Estação de Radiometria Solar localizada na área rural de Botucatu (Lat. 22,85°S, Long. 48,45°W e 786 m). A cidade de Botucatu tem um elevado gradiente de altitude entre 400 m, na região mais baixa a entre 980 m, na região mais alta, o que provoca mudanças na temperatura do ar e nos ventos (Santos & Escobedo, 2016). A cidade está inserida numa região com duas grandes represas (Barra Bonita e Jurumirim), áreas com grandes plantações de eucalipto e cana-de-açúcar, que ocasionam mudanças no microclima local, afetando o balanço de radiação e alterar a transmissão da NIR na atmosfera e a microfísica das nuvens (Santos & Escobedo, 2016) (Figura 1).

Com base em dados pluviométricos e termométricos mensais, o clima de Botucatu é classificado como Cwa (CPA,

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: <http://www.unica.com.br/production-map/> e Google imagens.



2017), temperado quente (mesotérmico), com verão quente e úmido e inverno seco (Figura 2a e b). A nebulosidade (f) expressa à fração do número de horas em que o sol ficou encoberta por nuvens no dia (Figura 2c). A evolução sazonal da nebulosidade segue a variação da série climática da temperatura sendo mais elevada no verão e menor no inverno.

A evolução sazonal da precipitação segue as evoluções da temperatura do ar e da nebulosidade (Figura 2d). É constituída de dois períodos distintos: chuvoso e seco, onde o limite entre os períodos é o valor da precipitação média mensal abaixo de 75 mm (Santos & Escobedo, 2016) e a maior precipitação ocorre no verão e a mínima no inverno.

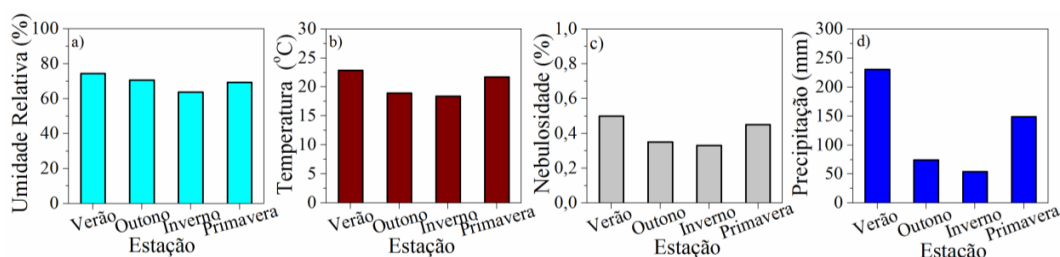
Medidas das irradiâncias global e difusa dos espectros total e infravermelho

As medidas das irradiâncias global e difusa dos espectros total e infravermelho foram realizadas nos anos de 2003 a 2006. Devido a problema operacional, as medições deste espectro solar foram limitadas a este período. São considerados dias da base de dados quando as irradiâncias global do espectro total (I^G) e infravermelho (I^G_{NIR}) e as irradiâncias difusas do espectro total (I^d) e infravermelho (I^d_{NIR})

foram medidas simultaneamente. 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 3,0mm e 0,70 a 3,0mm, respectivamente. As irradiâncias difusas dos dois espectros (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 3,0mm e 0,70 a 3,0mm, respectivamente, utilizando anéis de sombreamento tipo MEO (Melo & 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 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 (Dal Pai et al. 2016). 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. Assim as irradiâncias direta e direta infravermelha obtidas pelo método da diferença,

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



por meio das equações, possuem incerteza estimada na ordem de 12,8% (Dal Pai et al. 2011 e 2014):

$$I^D = I^G - I^d \quad (1)$$

$$I_{NIR}^D = I_{NIR}^G - I_{NIR}^d \quad (2)$$

Na aquisição dos dados, foi utilizado um Datalogger Campbell 23X, operando na frequência de 1 Hz e armazenando médias a cada 5 minutos. Os dados de irradiâncias (I^G , I^d , I^D e I_{NIR}^G , I_{NIR}^d , I_{NIR}^D) passaram por um controle de qualidade onde foram eliminados os valores espúrios e, numa segunda etapa, foram processados para obtenção das integrações diárias das irradiações: H^G , H^d , H^D e H_{NIR}^G , H_{NIR}^d e H_{NIR}^D (Chaves & Escobedo, 2000). As frações solares foram obtidas a partir das seguintes relações: $K_{NIR}^G = H_{NIR}^G / H^G$ (K_{NIR}^G é fração global do infravermelho, H_{NIR}^G é a irradiação solar global infravermelho e H^G é a irradiação solar global), $K_{NIR}^d = H_{NIR}^d / H^d$ (K_{NIR}^d é fração difusa infravermelho, H_{NIR}^d é a irradiação solar difusa infravermelho e H^d é a irradiação solar difusa) e $K_{NIR}^D = H_{NIR}^D / H^D$ (K_{NIR}^D é fração direta infravermelho, H_{NIR}^D é a irradiação solar direta infravermelho e H^D é a irradiação solar direta). A fração transmitida da irradiação global (K_t) foi calculada por: $K_t = H^G / H^0$, onde H^0 é a irradiação solar no topo da atmosfera (Iqbal, 1983). A fração da irradiação difusa na irradiação global (K^d) na superfície atmosférica foi calculado por: $K^d = H^d / H^G$.

Validações das equações de estimativas

Utilizou-se uma base de dados diários de um ano das frações global e difusa, denominada como ano atípico. O ano atípico foi selecionado da própria base total considerando metodologia descrita a seguir e observações locais. O uso do ano atípico pode ser encontrado em (Silva et al. 2017). 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 media-interanos 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 medias interanos (Tabela 1).

Indicativos Estatísticos

Os indicativos estatísticos rMBE (Relative Mean Bias Error) e rRMSE (Relative Root Mean Square Error) empre-

gados na avaliação do desempenho das equações de estimativa diária das irradiações global, difusa e direta infravermelha foram:

$$rMBE(\%) = \frac{100}{\bar{X}} \times \frac{\sum_{i=1}^N (H_E - H_M)}{N} \quad (3)$$

$$rRMSE(\%) = \frac{100}{\bar{X}} \times \left[\frac{\sum_{i=1}^N (H_E - H_M)^2}{N} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

onde: H_E representa os valores estimados, H_M os valores

medidos. $\left(\bar{X} = \frac{1}{X} \sum_{i=1}^X H_M \right)$ é o valor médio da medida e N o número de observações. Valores negativos de rMBE indicam subestimativa das equações e vice-versa, quanto menor o valor absoluto de rMBE, melhor é o desempenho das equações. O rRMSE 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 rRMSE, melhor desempenho das equações de estimativas. Recomendações quantitativas são por vezes usadas para validação de modelos: rMBE dentro de $\pm 10\%$ e rRMSE < 20%, que indica bom ajuste entre as estimativas por modelos e as medidas na superfície (Badescu et al. 2013).

Resultados e discussão

Correlações das frações K_{NIR}^G , K_{NIR}^d e K_{NIR}^D em função de K_t

Para melhor ilustrar a dependência das frações com os constituintes atmosféricos: nuvens, vapor de água e aerossóis, Figura 3, mostra as correlações entre os valores de K_{NIR}^G , K_{NIR}^d e K_{NIR}^D em função de K_t . O espalhamento das correlações para as três irradiações é bastante elevado, nas quais para cada valor de K_t há um largo intervalo de variação nos valores K_{NIR}^G , K_{NIR}^d e K_{NIR}^D , respectivamente. O espalhamento ocorre porque existe grande variabilidade das concentrações de nuvens, vapor de água e aerossóis na atmosfera que absorvem e espalham as irradiações diferentemente com maior ou menor intensidade nas quatro estações do ano, para os mesmos valores de K_t . As nuvens e os aerossóis são os principais constituintes atmosféricos que reduzem a incidência da irradiação solar do espectro visível através dos processos de absorção e espalhamento, enquanto o vapor d'água é um importante constituinte responsável pela absorção na banda de NIR (Iqbal, 1983).

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

	Ano / mês - Atípico											
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
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

A Figura 3a mostra que existe uma pequena correlação ($r = 0,55$) entre K_{NIR}^G e Kt , com valores de K_{NIR}^G crescentes lentamente com o aumento de Kt . Os valores de K_{NIR}^G crescem em sequência das coberturas de céu nebuloso, parcialmente nublado e aberto. A regressão linear gerada possui coeficiente angular próximo de zero (0,09), $R^2 = 0,30$ 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, com o 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 curtas são preferencialmente extintos (Alados & Arboledas, 1999). Ao contrário de K_{NIR}^G e Kt , a relação K_{NIR}^d e Kt , (Figura 3b), é polinomial e existe uma correlação ($r = 0,738$) mais significativa 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 $Kt > 0,65$.

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 nos comprimentos longos do infravermelho que nos demais

comprimentos do espectro solar, 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, porque o espalhamento de H_{NIR}^d e H^d por aerossóis é desproporcional, sendo maior para H^d nos comprimentos curtos do que para H_{NIR}^d decrescendo assim o valor de K_{NIR}^d . A (Figura 3c) 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 mostra que a variação da cobertura de céu também possui pouca influência 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 .

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 (Figura 3), são substituídas por variações dos valores médios de \bar{K}_{NIR}^G (Figura 4), e \bar{K}_{NIR}^d , (Figura 5), em funções de intervalos discretos centesimais de Kt . Essa técnica foi usada em vários estudos com a irradiação difusa (Orgill & 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

Figura 3. Correlações das frações K_{NIR}^G (a), K_{NIR}^d (b) e K_{NIR}^D (c) em função de Kt .

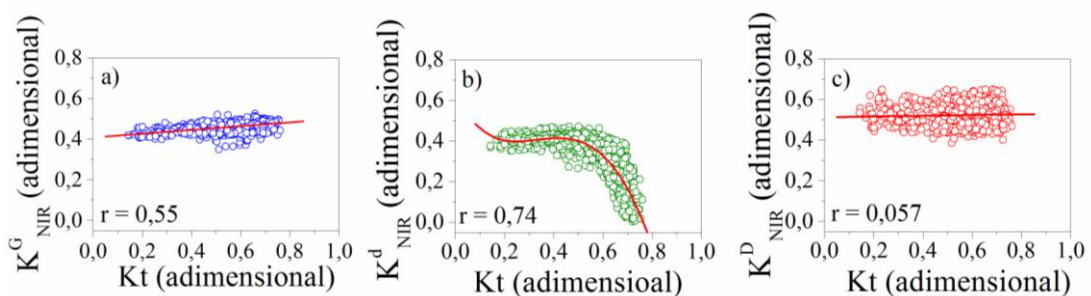
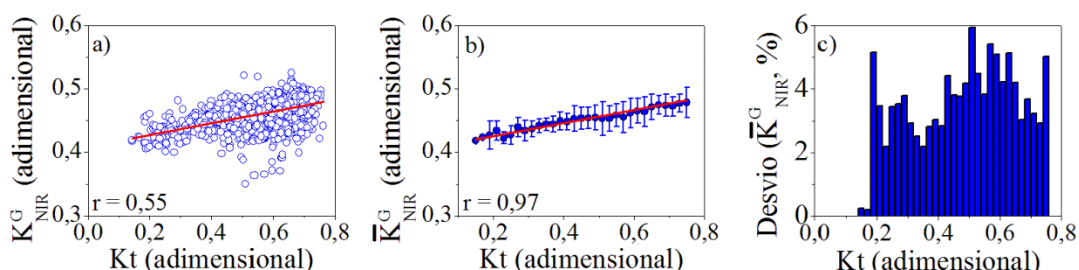


Figura 4. Correlações: a) \bar{K}_{NIR}^G em função de Kt ; b) \bar{K}_{NIR}^d em função de Kt , e c) valores de $\delta\bar{K}_{NIR}^G$ em função de Kt .



valor médio \bar{K}_{NIR}^G e \bar{K}_{NIR}^d onde os alteres representam, os respectivos desvios relativos médios, $\delta\bar{K}_{NIR}^G$ e $\delta\bar{K}_{NIR}^d$ como mostrado na (Figura 4c) e na (Figura 5c).

Assim as correlações dos valores de \bar{K}_{NIR}^G e \bar{K}_{NIR}^d ambas em função de K_t , são do tipo linear e polinomial, ambas com elevados coeficientes de correlações ($r = 0,979$ e $r = 0,971$, respectivamente). Entre os polinomiais ajustados, estes foram os que apresentaram os maiores valores de coeficientes de correlações, sendo os demais ajustes aqui não apresentados. As equações obtidas são apresentadas por meio das eq. (5) e eq. (6) com seus respectivos coeficientes de determinação, $R^2 = 0,958$ e $R^2 = 0,960$:

$$\bar{K}_{NIR}^G = 0.408 + 0.092K_t \quad (5)$$

$$\bar{K}_{NIR}^d = 0.324 + 0.518K_t - 1.37K_t^2 + 3.058K_t^3 - 3.68K_t^4 \quad (6)$$

Os elevados coeficientes de determinação, próximos a 1 mostram que os valores \bar{K}_{NIR}^G e \bar{K}_{NIR}^d estão correlacionados em cada intervalo de K_t entre 0,15 a 0,75. Os valores $\delta\bar{K}_{NIR}^G$ (Figura 4c) e $\delta\bar{K}_{NIR}^d$ (Figura 5c) expressam a amplitude de variação de \bar{K}_{NIR}^G e \bar{K}_{NIR}^d em cada intervalo centesimal de K_t . O valor de $\delta\bar{K}_{NIR}^G$ variou em até 6,0%, sem uma tendência definida, com K_t variando entre 0,15 a 0,75, ou seja, a amplitude de variação do \bar{K}_{NIR}^G não dependeu das variações de cobertura de céu. Há valores de $\delta\bar{K}_{NIR}^G$ acima 5,0% e abaixo de 3,0%. Os resultados mostram que a eq. (5) pode ser

utilizada na estimativa de \bar{K}_{NIR}^G com elevado coeficiente de determinação, e que a incerteza da estimativa depende do valor de K_t , podendo variar entre 2% a 6% em função da variação da cobertura de céu entre céu nebuloso a aberto.

Diferentemente de $\delta\bar{K}_{NIR}^G$, o valor de $\delta\bar{K}_{NIR}^d$ variou em função da variação da cobertura de céu com tendência definida. Ou seja, para uma variação de K_t entre 0 e 0,75, o valor de \bar{K}_{NIR}^d reduziu exponencialmente no sentido crescente de K_t , aumentando consideravelmente da cobertura de céu nublada ($K_t < 0,35$) com valor de 7% até a cobertura de céu aberta ($K_t > 0,65$), em que $\delta\bar{K}_{NIR}^d$ atingiu valores da ordem de 60,0%. A larga variação de \bar{K}_{NIR}^d na cobertura de céu aberto está associada aos efeitos da anisotropia da irradiação difusa, devido a variação da concentração de aerossóis, não foram considerados sobre as correções na medida da irradiação difusa isotrópica. O resultado mostra que a eq. (6) pode ser utilizada na estimativa de \bar{K}_{NIR}^d com elevado coeficiente de determinação $R^2 = 0,960$ e com incertezas variando entre 5% a 60%, dependendo do valor de K_t .

A (Figura 6) mostra as correlações obtidas na validação, comparação entre estimativa de \bar{K}_{NIR}^G e \bar{K}_{NIR}^d (equações 5 e 6) e as medidas de \bar{K}_{NIR}^G e \bar{K}_{NIR}^d do ano atípico.

As correlações são lineares nos intervalos de variação de K_{NIR}^G e K_{NIR}^d e os coeficientes de correlação (r): $r_{NIR}^G = 0,961$, $r_{NIR}^d = 0,953$ mostram que as estimativas e as medidas, próximo de 1 estão bem correlacionadas estatisticamente. Para a eq. (5) os valores obtidos para rMBE e rRMSE

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

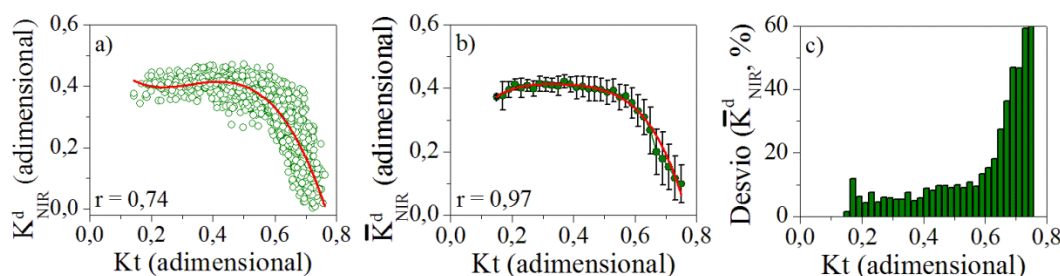
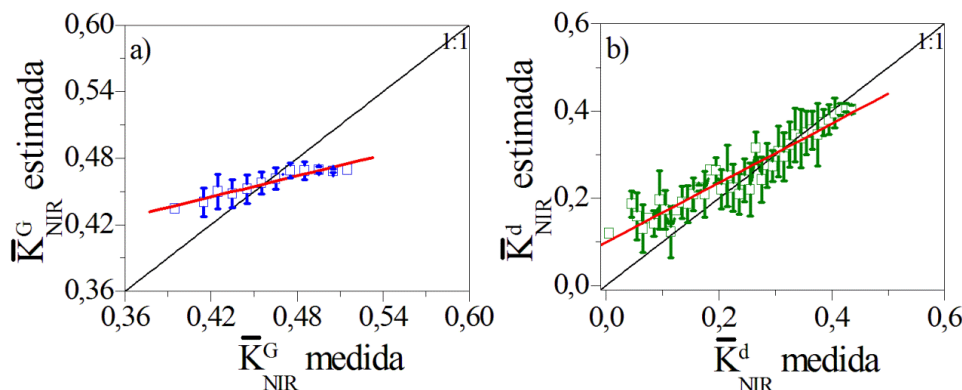


Figura 6. Comparação entre os valores estimados e medidos para o ano atípico de: a) \bar{K}_{NIR}^G e b) \bar{K}_{NIR}^d .



foram de 2,8% e 3,8%, respectivamente, enquanto que para a eq. (6) esses índices foram de 1,0% e 13,7% respectivamente. Na escala classificatória (Jamieson et al. 1991; Li et al. 2013) o desempenho do modelo foi: excelente para K_{NIR}^G ($rRMSE < 10\%$) e bom para \bar{K}_{NIR}^d ($10\% \leq rRMSE < 20\%$). Desta forma, os modelos estatísticos propostos pode ser usados nas estimativas de \bar{K}_{NIR}^G e \bar{K}_{NIR}^d .

Equação de estimativa da fração média \bar{K}_{NIR}^d em função de K^d

Para locais onde a irradiação difusa é monitorada, a estimativa \bar{K}_{NIR}^d também pode ser feita em função de medidas de radiação difusa, ou seja, trocando K_t por K^d . A (Figura 7) mostra a correlação entre os valores de K_{NIR}^d em função de K^d . Similarmente, as correlações K_{NIR}^G , K_{NIR}^d e K_{NIR}^D em função de K_t , a dispersão de K_{NIR}^d em função de K^d é também muito elevada. Para cada valor de K^d há um largo intervalo nos valores K_{NIR}^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 , (Figura 7b), 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.

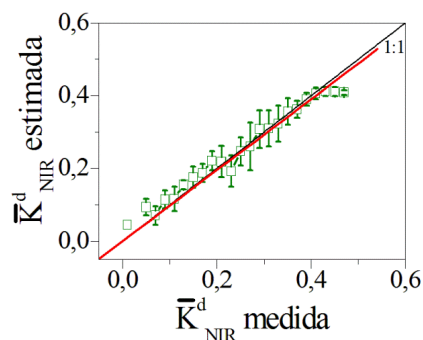
A correlação dos valores de \bar{K}_{NIR}^d em função de K^d , (Figura 7b) é do tipo polinomial de quarta ordem, com elevado coeficiente de correlação ($r = 0,991$). A equação de regressão obtida com respectivo coeficiente de determinação $R^2 = 0,982$ foi:

$$\bar{K}_{NIR}^d = -0.166 + 3.49K^d - 0.44(K^d)^2 + 9.28(K^d)^3 - 3.80(K^d)^4 \quad (7)$$

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 Figura 8 mostra a correlação obtida na validação, comparação entre estimativa de \bar{K}_{NIR}^d por meio da eq. (7) e a medida de K_{NIR}^d do ano atípico. A correlação entre os valores estimados e medidos estão em concordância com à 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

Figura 8. Comparação entre os valores estimados pela eq. (7) e medidos para o ano atípico de \bar{K}_{NIR}^d .



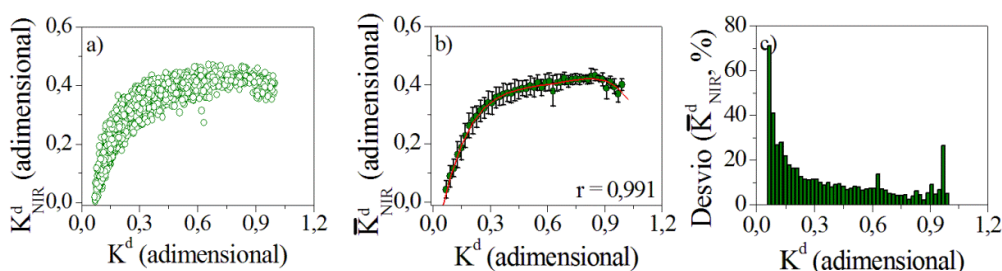
da equação e a medidas estão estatisticamente muito bem correlacionadas.

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

Conclusões

Análise por meio de regressões simples mostrou que K_{NIR}^G e K_{NIR}^d estão fracamente correlacionadas com K_t , e não há 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 $\bar{K}_{NIR}^G \times K_t$ e polinomial para $\bar{K}_{NIR}^d \times K_t$. Similarmente, polinomial para $\bar{K}_{NIR}^d \times K^d$. A validação por meio dos indicativos estatísticos mostra que as equações 5 e 6 podem ser utilizadas nas estimativas de \bar{K}_{NIR}^G e \bar{K}_{NIR}^d em função de K_t . Similarmente, a equação 7 pode ser usada na estimativa de \bar{K}_{NIR}^d em função de K^d . A avaliação de técnicas de aprendizado de máquinas (RNA, SVM e ANFIS) na estimativa de K_{NIR}^G , K_{NIR}^d e K_{NIR}^D seria algo interessante como proposta futura.

Figura 7. Correlações a) K_{NIR}^d em função de K^d , e b) \bar{K}_{NIR}^d em função de K^d e c) δK_{NIR}^d em função de K^d .



Contribuição dos autores

J. F. ESCOBEDO foi o mentor da pesquisa, responsável por acompanhar as medições, redação e revisão do artigo. T. J. ROSSI, C. M. SANTOS e M. B. P. Silva responsável pela análise dos dados, elaboração das figuras e tabelas, redação e revisão do artigo.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao suporte financeiro fornecido pela CAPES, CNPq e FAPESP

Referências

- ALADOS, I.; ALADOS-ARBOLEDAS, L. Direct and diffuse photosynthetically active radiation: measurements and modelling. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.93, p.27-38, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(98\)00107-5](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(98)00107-5).
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.11.037>.
- BARTOLI, B.; CUOMO, V.; AMATO, U. ET AL. Diffuse and beam components of daily global radiation in Genova and Macerata. **Solar Energy**, v.28, p.307-11, 1982. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(82\)90304-8](https://doi.org/10.1016/0038-092X(82)90304-8).
- BENDIGANAVALA, A.; MALSHE, V. Infrared reflective inorganic pigments. **Recent Patents on Chemical Engineering**, v.1, n.1, 67-79, 2008. http://busseiqaanda.la.coocan.jp/Infrared_reflecting_pigment.pdf.
- CHAVES, M.; ESCOBEDO, J. F. A software to process daily solar radiation data. **Renewable Energy**, v.19, p.339-344, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(99\)00050-6](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(99)00050-6).
- 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. <https://doi.org/10.1007/s00704-007-0326-0>.
- COSER, E.; MORITZ, V. F.; KRENZINGER, A.; FERREIRA, C. A. Development of paints with infrared radiation reflective properties. **Polímeros**, v.25, n.3, p.305-310, 2015. <https://doi.org/10.1590/0104-1428.1869>.
- CPA, 2017. **Clima dos Municípios Paulistas**. Disponível em <http://www.cpa.unicamp.br> (Acesso em <17/06/2017>).
- DAL PAI, A.; ESCOBEDO J. F.; CORREA, F. H. Numerical correction for the diffuse solar irradiance by the Melo-Escobedo shadowring measuring method. In: **ISES SOLAR WORLD CONGRESS**, Kassel, 2011. <http://proceedings.ises.org/paper/swc2011/swc2011-0333-DalPai.pdf>.
- DAL PAI, A.; ESCOBEDO, J. F.; DAL PAI, E.; OLIVEIRA, A. P.; SOARES, J. R.; CODATO, G. MEO shadowring method for measuring diffuse solar irradiance: Corrections based on sky cover. **Renewable Energy**, v. 99, p. 754-763, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.07.026>.
- ERBS, D. G.; KLEIN, S. A.; DUFFIE, J. A. Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation. **Solar Energy**, v.28, p.293-302, 1982. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(82\)90302-4](https://doi.org/10.1016/0038-092X(82)90302-4).
- 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**, v. 86, p. 299-309, 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.04.013>.
- 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**, v.36, p.169-178, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.06.018>.
- HASSANIEN, R. H. E.; LI, M.; LIN, W. D. Advanced applications of solar energy in agricultural green houses. **J. Renew. Sustain. Energ.** 54 989-1001, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.095>.
- Iqbal, M. **An Introduction to Solar Radiation**. New York: Academic Press., 1983.
- JAMIESON, P. D.; PORTER, J. R.; WILSON, D. R. A test of the computer simulation model ARC-WHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. **Field Crops Res.**, 27:337-50, 1991. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(91\)90040-3](https://doi.org/10.1016/0378-4290(91)90040-3).
- KAUR, B.; QUAZI, N.; IVANOV, I.; BHATTACHARYA, S. N. Near-infrared reflective properties of perylene derivatives. **Dyesand Pigments**, 92(3), 1108-1113, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2011.06.011>.
- 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**, 18:271-287, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.09.041>.
- LI, M.; TANG, X.; WU, W.; et al. General models for estimating daily global solar radiation for different solar radiation zones in mainland China. **Energy Convers. Manag.** 70, 139-148, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.03.004>.
- MARTINEZ-LOZANO, J. A.; TENA, F.; UTRILLAS, M. P. Ratio of UV to global broad band irradiation in Valencia, Spain. **International Journal of Climatology**, 19:903-11, 1999. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0088\(19990630\)19:8<903::AID-JOC400>3.0.CO;2-N](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0088(19990630)19:8<903::AID-JOC400>3.0.CO;2-N).
- 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**, 1994.
- 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. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(77\)90006-8](https://doi.org/10.1016/0038-092X(77)90006-8).
- PRATUMMASOOT, N.; CHOOSRI, P.; BUNTOUNG, S. MUNDPOOKHIEW, T. Estimation of Hourly Near Infrared Radiation Using Artificial Neural Network and Performance Comparison with the Semi-Empirical Model at Nakhon Pathom Province. **Naresuan University Journal: Science and Technology**, (28) 4, 2020. <https://doi.org/10.14456/nujst.2020.40>.
- 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.
- SANTOS, C. M.; ESCOBEDO J. F. Temporal variability of atmospheric turbidity and DNI attenuation in the sugarcane region, Botucatu/SP. **Atmospheric Research**, 181:312-321, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.07.012>.
- SILVA, M. B. P.; ESCOBEDO, J. F.; ROSSI, T. J.; SANTOS, C. M.; SILVA, S. H. M. G. Performance of the Angstrom-PreScott Model (A-P) and SVM and ANN techniques to estimate daily global solar irradiation in Botucatu/SP/Brazil. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**160:11-23, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.04.001>.
- TANAKA, Y.; NAKAYAMA, J. Upregulated epidermal growth factor receptor expression following near-infrared irradiation simulating solar radiation in a three-dimensional reconstructed human corneal epithelial culture model. **Clinical Interventions in Aging** v.11, p.1027-1033, 2016. DOI:10.2147/CIA.S111530.
- THONGRASMEE, W.; TOHSING, K.; JANJAI, S. A model for calculating daily nearinfrared solar radiation. IOP Conf. Series: **Journal of Physics: Conf. Series** 1144 (2018) 012040 doi : 10.1088/1742-6596/1144/1/012040
- WANG, L.; KISI, O.; ZOUNEMAT-KERMANI, M.; HU GONG, B. W. Modeling and comparison of hourly photosynthetically active radiation in different ecosystems. **Renew. Sustain. Energ. Rev.** v.56, p.436-53, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.068>.

WEISS, A.; NORMAN, J. M. Partitioning solar radiation into direct and diffuse, visible and near infrared component. **Agric. For. Meteorol.** v.34, p.205-213, 1985. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(85\)90020-6](https://doi.org/10.1016/0168-1923(85)90020-6).

ZHAO, X.; YAO, C.; LIU, T., ET AL. Extending the Photovoltaic Response of Perovskite Solar Cells into the Near-Infrared with a Narrow-Bandgap Organic Semiconductor. **Adv. Mater.** V.31, 1904494 (pag. 1 - 9), 2019. <https://doi.org/10.1002/adma.201904494>.

REFERENCIAÇÃO

ROSSI, T. J.; ESCOBEDO, J. F.; SANTOS, C. M.; SILVA, M. B. P. Modelagem das frações solares global (\overline{K}_{NIR}^G) e difusa (\overline{K}_{NIR}^d) do infravermelho em função de frações do espectro solar total. **Agrometeoros, Passo Fundo**, v.29, e026861, 2021.



Modeling of the infrared global (\bar{K}_{NIR}^G) and diffuse (\bar{K}_{NIR}^d) as a function of fractions of the total solar spectrum

Taiza Juliana Rossi¹, João Francisco Escobedo¹, Cícero Manoel dos Santos^{2(*)} and Maurício Bruno Prado da Silva¹

¹UNESP – Faculdade de Ciências Agrônomicas/Departamento de Engenharia Rural. Av. Universitária, 3780 - Altos do Paraíso, CEP 18610-034 Botucatu, SP, Brazil. E-mails: taiza.rossi@unesp.br, j.escobedo@unesp.br and mauricio.prado19@hotmail.com.

²Universidade Federal do Pará - Faculdade de Engenharia Agrônômica. Rua Cel. José Porfírio, 2515 - São Sebastião, CEP 68372-040 Altamira, PA, Brazil. E-mail: ciceromanoel2007@gmail.com

(*)Corresponding author.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 23 December 2020

Accepted 26 June 2021

Index terms:

global solar radiation

solar fractions

spectral fractions

infrared solar radiation

statistical models

ABSTRACT

The article describes obtaining and validating equations to estimate the global (\bar{K}_{NIR}^G) and diffuse (\bar{K}_{NIR}^d) fractions of the infrared spectrum as a function of the solar fractions global (K_t) and diffuse (K^d) of the total spectrum. The measurements of the global and diffuse irradiances were from 2003 to 2006 in Botucatu/SP/Brazil. In statistical modeling, the average values of \bar{K}_{NIR}^G and \bar{K}_{NIR}^d were equated as a function of K_t by means of linear and polynomial regression, respectively. Similarly, the average values of \bar{K}_{NIR}^d as a function of K^d by means of polynomial regression. The statistical validation indexes (rMBE and rRMSE) were used to evaluate the performance of the models. The determination coefficients obtained for the three correlations as a function of K_t and K^d were higher $R^2 = 0.960$. The statistical indications obtained in the validation: \bar{K}_{NIR}^G (rMBE = 2.8% and rRMSE = 3.8%) and \bar{K}_{NIR}^d (rMBE = 1.0% and rRMSE = 13.7%) show that the equations can be used in the estimates of \bar{K}_{NIR}^G and \bar{K}_{NIR}^d as a function of K_t , respectively, with precision and accuracy. Similarly, \bar{K}_{NIR}^d (rMBE = 0.5% and rRMSE = 10.7%) in the \bar{K}_{NIR}^d estimate as a function of K^d .

© 2021 SBAgro. All rights reserved.

CITATION

ROSSI, T. J.; ESCOBEDO, J. F.; SANTOS, C. M.; SILVA, M. B. P. Modelagem das frações solares global (\bar{K}_{NIR}^G) e difusa (\bar{K}_{NIR}^d) do infravermelho em função de frações do espectro solar total. **Agrometeoros**, Passo Fundo, v.29, e026861, 2021.