

**UFRRJ**  
**INSTITUTO DE FLORESTAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PRÁTICAS EM**  
**DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL**

**DISSERTAÇÃO**

**Modelagem da Transferência Radiativa em Cultivo de**  
**Cana-de-Açúcar por Meio da Aproximação *Two-Stream***  
**e do Método das Diferenças Finitas**

**Joana Madeira Krieger**

**2018**



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO**  
**INSTITUTO DE FLORESTAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PRÁTICAS EM DESENVOLVI-**  
**MENTO SUSTENTÁVEL**

**MODELAGEM DA TRANSFERÊNCIA RADIATIVA EM CULTIVO DE**  
**CANA-DE-AÇÚCAR POR MEIO DA APROXIMAÇÃO *TWO-STREAM* E**  
**DO MÉTODO DAS DIFERENÇAS FINITAS**

**JOANA MADEIRA KRIEGER**

*Sob orientação do Professor*  
**Gustavo Bastos Lyra, Dr.**

*e coorientação do Professor*  
**Fábio Freitas Ferreira, Dr.**

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Ciências**, no Programa de Pós-Graduação em Práticas em Desenvolvimento Sustentável da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

Seropédica – RJ  
Dezembro de 2018

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
Biblioteca Central / Seção de Processamento Técnico

Ficha catalográfica elaborada  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

K89m Krieger, Joana Madeira, 1990-  
MODELAGEM DA TRANSFERÊNCIA RADIATIVA EM CULTIVO DE  
CANA-DE-AÇÚCAR POR MEIO DA APROXIMAÇÃO TWO-STREAM E DO  
MÉTODO DAS DIFERENÇAS FINITAS / Joana Madeira Krieger.  
- 2018.  
94 f.

Orientador: Gustavo Bastos Lyra.  
Coorientador: Fábio Freitas Ferreira.  
Dissertação(Mestrado). -- Universidade Federal  
Rural do Rio de Janeiro, Pós-Graduação em Práticas em  
Desenvolvimento Sustentável, 2018.

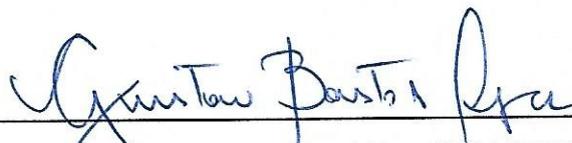
1. Microclimatologia. 2. Balanço de Radiação. 3.  
Matemática Computacional. 4. Métodos Numéricos. I.  
Lyra, Gustavo Bastos, 1975-, orient. II. Ferreira,  
Fábio Freitas, 1975-, coorient. III Universidade  
Federal Rural do Rio de Janeiro. Pós-Graduação em  
Práticas em Desenvolvimento Sustentável. IV. Título.

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO  
INSTITUTO DE FLORESTAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PRÁTICAS EM DESENVOLVIMENTO  
SUSTENTÁVEL**

**JOANA MADEIRA KRIEGER**

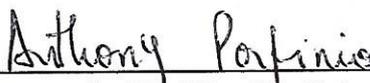
Dissertação/Tese submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Ciências**, no Programa de Pós-graduação em Práticas em Desenvolvimento Sustentável, área de Concentração em Práticas em Desenvolvimento Sustentável.

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 13/12/2018



---

**Gustavo Bastos Lyra, Prof. Dr., DCA/IF/UFRRJ  
(Orientador)**



---

**Anthony Carlos Silva Porfírio, Dr., INPE**



---

**Francisco Leite de Albuquerque Neto, Prof. Dr., UFRJ**



---

**Mônica Carneiro Alves Senna, Prof. Dra., UFF**

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Marcelo e Patricia, e ao meu irmão, Gustavo, pela dedicação, incentivo, apoio, parceria e amor na minha formação durante todos esses anos e muitos ainda por vir. Por toda a minha vida, o aprendizado com vocês nunca foi, nem será superado por diplomas.

Ao Frederico, meu parceiro de vida nessa etapa, pelo companheirismo, paciência, incentivo e amor nos altos e baixos dessa trajetória.

Ao Prof. Gustavo Bastos Lyra, pelos anos de orientação e incansável paciência que foram fundamentais para realização deste trabalho e das minhas recentes conquistas.

Ao Prof. Fábio Freitas Ferreira, pela orientação e fundamentais contribuições na implementação do modelo.

Ao Prof. José Leonaldo de Souza, coordenador do Laboratório de Agrometeorologia e Radiometria Solar da Universidade Federal de Alagoas (LARAS/UFAL), por disponibilizar os dados experimentais que possibilitaram o desenvolvimento desse trabalho.

A todos os meus familiares que contribuíram direta e indiretamente para minha formação, em especial às minhas avós, Lúcia e Malca (*in memoriam*), e aos meus avôs, David (*in memoriam*) e João.

Aos meus amigos e amigas da vida, pelas risadas, acolhimento e carinho de sempre que me trouxeram até aqui.

Às amigas que o mestrado me deu, pela troca, apoio e incentivo de sempre. Sem vocês seria mais difícil.

Ao PPGPDS e UFRRJ, pela oportunidade de fazer esse mestrado.

À UFF e ao PGEB, pelo apoio e acolhimento nesse processo.

A todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho, meu sincero agradecimento.

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de financiamento 001.

## RESUMO

A simulação dos processos dos ecossistemas terrestres por meio de modelos de biosfera-atmosfera, possíveis de serem acoplados a modelos numéricos atmosféricos, auxilia no diagnóstico e prognóstico mais preciso das condições de tempo e clima. Para realizar previsões mais realistas, são necessários modelos calibrados para áreas de interesse e, que reflitam melhor a interação entre biosfera e atmosfera local. Desta forma, o presente estudo tem por objetivo implementar, calibrar e avaliar um modelo de transferência radiativa baseado na aproximação *two-stream* a partir da sua resolução por diferenças finitas aplicado em cultivo de cana-de-açúcar. O modelo de transferência radiativa foi implementado em ambiente de modelagem aberto (*Scilab*) e resolvido por meio do Método das Diferenças Finitas: método de Euler combinado com *Shooting Method* e comparado aos dados observados em campo. Sua otimização (calibração) foi realizada por meio de Modelagem Inversa, usando o método Luus-Jaakola. Para isso, foram realizadas medidas das componentes do balanço de radiação de ondas curtas acima de um cultivo de cana-de-açúcar (cv RB 92579) em Rio Largo, estado de Alagoas. As medidas foram realizadas por um saldo radiômetro instalado em uma torre micrometeorológica de 6 m de altura no período de 17 a 24/02/2006. Neste período, também se realizaram medidas do número de folhas expandidas e as determinações de comprimento e largura das folhas, utilizadas para estimar o índice de área foliar (IAF). Como o modelo proposto necessita de dados de irradiação solar global incidente no topo do dossel, discriminados em suas componentes direta e difusa, testaram-se previamente dois modelos empíricos (polinomial de 3º e logístico), que relacionam a transmitância da atmosfera e a fração de radiação difusa em relação a global. No ajuste desses modelos empíricos foram utilizados dados horários medidos de radiação solar global e difusa entre os anos de 1997 e 1999. Nos testes dos modelos, avaliou-se a precisão e exatidão das simulações expressos pelos índices estatísticos, respectivamente, coeficiente de determinação ( $r^2$ ), coeficiente de concordância de Willmott ( $d$ ) e raiz do quadrado médio do erro percentual ( $RQME$ ). O modelo polinomial de 3º teve maior precisão ( $r^2 = 0,932$ ) e exatidão ( $d = 0,965$  e  $RQME = 24\%$ ) em relação ao logístico ( $r^2 = 0,895$ ,  $d = 0,952$  e  $RQME = 28\%$ ) quanto a estimativa de  $S_0^\downarrow$ . Os parâmetros utilizados pelo modelo *two-stream* proposto foram otimizados em relação a radiação solar refletida ( $S^\uparrow$ ) no topo do dossel e apresentaram resultados coerentes com os reportados na literatura ( $\chi = -0,3880$ ,  $\alpha_{vis} = 0,2468$ ,  $\tau_{vis} = 0,0652$ ,  $\rho_{vis} = 0,1759$ ,  $\alpha_{iv} = 0,4816$ ,  $\tau_{iv} = 0,3436$ ,  $\rho_{iv} = 0,6500$ ). As simulações para  $S^\uparrow$  no topo do dossel mostraram elevada exatidão ( $d > 0,99$  e  $RQME < 3,6\%$ ) e precisão ( $r^2 > 0,99$ ). Apesar disso, o modelo subestimou  $S^\uparrow$  no início do dia, com o ângulo zenital inferior a  $60^\circ$ , entorno de 7 h da manhã. Para o albedo a precisão e exatidão foi dentro dos padrões de modelos aceitos ( $r^2 > 0,73$ ,  $d > 0,89$  e  $RQME < 6,5\%$ ).

**PALAVRAS-CHAVES:** Biosfera-atmosfera, Culturas Agrícolas, Parametrização, Balanço de Radiação.

## ABSTRACT

The simulation processes of terrestrial ecosystems through biosphere-atmosphere models, which can be coupled to atmospheric numerical models, helps in the diagnosis and more accurate prognosis of weather and climate conditions. To make more realistic forecasts, calibrated models are needed for areas of interest that better reflect the interaction between biosphere and local atmosphere. Thus, the present study aims to implement, calibrate and evaluate a radiative transfer model based on the two-stream approximation from its resolution by finite differences applied in sugar cane cultivation. The radiative transfer model was implemented in an open modeling environment (Scilab) and solved by means of the Finite Differences Method: Euler method combined with Shooting Method and compared to data observed in the field. Its optimization (calibration) was performed using Reverse Modelling with the Luus-Jaakola method. For this, measurements of the components of the short-wave radiation balance above a sugarcane crop (cv RB 92579) were obtained in Rio Largo, state of Alagoas. The measurements were performed by a radiometer balance installed in a 6 m high micrometeorological tower from February 17 to 24, 2006. During this period, measurements were also made of the number of expanded leaves and the determinations of leaf length and width, used to estimate leaf area index (LAI). As the proposed model requires data of global solar irradiation incident on the top of the canopy, discriminated in its direct and diffuse components, two empirical models (polynomial of 3° and logistic) were previously tested, which relate the atmosphere transmittance and the fraction of diffuse to global radiation. In the adjustment of these empirical models, measured global and diffuse solar radiation between 1997 and 1999 were used. In the tests of the models, the accuracy and precision of the simulations expressed by the statistical coefficients were evaluated, respectively, coefficient of determination ( $r^2$ ), Willmott's concordance coefficient ( $d$ ) and percentage root mean square error ( $RMSE$ ). The polynomial of 3° model had higher precision ( $r^2 = 0.932$ ) and accuracy ( $d = 0.965$  and  $RMSE = 24\%$ ) in relation to logistic ( $r^2 = 0.895$ ,  $d = 0.952$  and  $RMSE = 28\%$ ) for the estimate of  $S_0^\downarrow$ . The parameters used for the proposed two-stream model were optimized in relation to reflected solar radiation ( $S^\uparrow$ ) at the top of the canopy and presented consistent results related to those reported in the literature ( $\chi = -0.3880$ ,  $\alpha_{vis} = 0.2468$ ,  $\tau_{vis} = 0.0652$ ,  $\rho_{vis} = 0.1759$ ,  $\alpha_{iv} = 0.4816$ ,  $\tau_{iv} = 0.3436$ ,  $\rho_{iv} = 0.6500$ ). The simulations for  $S^\uparrow$  at the top of the canopy showed high accuracy ( $d > 0.99$  and  $RMSE < 3.6\%$ ) and precision ( $r^2 > 0.99$ ). Despite this, the model underestimated  $S^\uparrow$  at the beginning of the day, with the zenith angle less than  $60^\circ$ , around 7 o'clock in the morning. This observation corroborates the analysis made for albedo results. Although albedo precision and accuracy were observed within the accepted model standards ( $r^2 > 0.73$ ,  $d > 0.89$  and  $RMSE < 6.5\%$ ).

**KEY WORDS:** Biosphere-Atmosphere, Agricultural Crops, Parametrization, Radiation Balance.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 3.1</b> Espectro eletromagnético .....	6
<b>Figura 3.2</b> Curvas do espectro de emissão de radiação pelo Sol assumindo um corpo negro à uma temperatura de 5900 K, a radiação solar que atinge o topo da atmosfera e a radiação solar incidente na superfície ao nível do mar apresentando as bandas de absorção da radiação incidente pelos diferentes gases constituintes da atmosfera .....	14
<b>Figura 3.3</b> Variação da radiação difusa diária ( $k_d$ ) por $k_t$ .....	17
<b>Figura 3.4</b> Variação da radiação difusa diária ( $k_d$ ) por $k_t$ .....	18
<b>Figura 4.1</b> Esquema de resolução por diferenças finitas .....	39
<b>Figura 4.2</b> Fluxograma da metodologia aplicada .....	51
<b>Figura 5.1</b> Relação entre a transmitância atmosférica global ( $k_t$ ) e a fração de irradiância solar difusa em relação a global ( $k_d$ ) médias horárias .....	54
<b>Figura 5.2</b> Relação linear entre $k_d$ observado e estimado pelos modelos: a) Logístico e b) Polinomial de 3° .....	55
<b>Figura 5.3</b> Relação de $k_t$ e $k_d$ horário médio mensal pelo modelo polinomial de 3° para os meses de teste: a) julho; b) agosto; c) setembro; d) outubro; e) novembro; f) dezembro .....	56
<b>Figura 5.4</b> Relação de $k_t$ e $k_d$ horário médio mensal pelo modelo logístico para os meses de teste: a) julho; b) agosto; c) setembro; d) outubro; e) novembro; f) dezembro .....	57
<b>Figura 5.5</b> Relação linear entre $S_0^\downarrow$ observado e estimado pelos modelos: a) logístico e b) polinomial de 3° .....	59
<b>Figura 5.6</b> Relação de $S_0^\downarrow$ horário médio mensal pelo modelo polinomial de 3° para os meses de teste: a) julho; b) agosto; c) setembro; d) outubro; e) novembro; f) dezembro.....	60
<b>Figura 5.7</b> Relação de $S_0^\downarrow$ horário médio mensal pelo modelo logístico para os meses de teste: a) julho; b) agosto; c) setembro; d) outubro; e) novembro; f) dezembro .....	61
<b>Figura 5.8</b> Relação entre a transmitância atmosférica global ( $k_t$ ) e a fração de irradiância solar difusa em relação a global ( $k_d$ ) horárias .....	62
<b>Figura 5.9</b> Relação linear entre a radiação solar refletida observada e estimada pelo modelo a) começando às 6h 30 da manhã; b) começando às 8h da manhã .....	66
<b>Figura 5.10</b> Avaliação gráfica do desempenho do modelo quanto à $S^\uparrow$ estimado no topo do dossel para cada dia usado para teste: a) 17/02/2006, b) 18/02/2006, c) 19/02/2006 e d) 20/02/2006 .....	66

<b>Figura 5.11</b> Relação entre o resíduo ( $W m^{-2}$ ), dados observados menos os estimados, de $S^{\uparrow}$ e: a) a hora local; b) o cosseno do ângulo zenital .....	68
<b>Figura 5.12</b> Relação linear entre o albedo do sistema observado e estimado pelo modelo a) come- çando às 6h 30 da manhã; b) começando às 8h da manhã .....	69
<b>Figura 5.13</b> Variação do albedo simulado e observado ao longo do dia para cada dia usado nos testes: a) 17/02/2006, b) 18/02/2006, c) 19/02/2006 e d) 20/02/2006 .....	70
<b>Figura 5.14</b> Relação entre o resíduo, dados observados menos os estimados, do albedo e: a) a hora do dia; b) o cosseno do ângulo zenital .....	71

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 3.1</b> Valores de $\chi$ apresentados por Bonan (1996) .....	23
<b>Tabela 3.2</b> Valores dos coeficientes de transmitância e refletância .....	25
<b>Tabela 3.3</b> Coeficientes de espalhamento típicos para folhas .....	26
<b>Tabela 3.4</b> Valores de albedo do solo.....	26
<b>Tabela 3.5</b> Albedo da vegetação e do solo .....	27
<b>Tabela 3.6</b> Albedo por classe de cor do solo .....	28
<b>Tabela 5.1</b> Valor e análise dos parâmetros empíricos ajustados e índices estatísticos para avaliação dos modelos logístico e Polinomial de 3° .....	52
<b>Tabela 5.2</b> Índices estatísticos para avaliação de $k_d$ e de $S_0^\downarrow$ dos modelos polinomial de 3° e logístico .....	57
<b>Tabela 5.3</b> Valores dos parâmetros do modelo ajustados por modelagem inversa para os dias 21 a 24 de fevereiro de 2006 .....	62
<b>Tabela 5.4</b> Índices estatísticos para avaliação do resultado de $S^\uparrow$ estimado no topo do dossel considerando a partir de 6h 30 e 8h da manhã .....	64
<b>Tabela 5.5</b> Índices estatísticos para avaliação do resultado de $\alpha$ estimado considerando a partir de 6h 30 e 8h da manhã .....	68

## LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

$e$	Energia dos Fótons [J]
$h$	Constante de Planck ( $6,63 \times 10^{-34}$ J s)
$c$	Velocidade da luz no vácuo [m/s]
$\lambda$	Comprimento de onda do fóton [m]
$E$	Densidade de fluxo de energia emitida [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]
$T$	Temperatura [K]
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann ( $5,67 \times 10^{-8}$ W $\text{m}^{-2}$ $\text{K}^{-4}$ )
$\lambda_{\text{máx}}$	Máximo comprimento de onda [ $\mu\text{m}$ ]
$\epsilon_{\Lambda}$	Emissividade do corpo em certo comprimento de onda
$\gamma_{\Lambda}$	Absortividade em certo comprimento de onda
$\omega_{\Lambda}$	Coefficiente de espalhamento em certo comprimento de onda
$\rho_{\Lambda}$	Reflectividade em certo comprimento de onda
$\rho_{\Lambda}^{\text{leaf}}$	Reflectividade em certo comprimento de onda para folha
$\rho_{\Lambda}^{\text{stem}}$	Reflectividade em certo comprimento de onda para galhos e tronco
$\rho_{\text{vis}}$	Reflectividade no espectro do visível
$\rho_{\text{iv}}$	Reflectividade no espectro do infravermelho próximo
$\tau_{\Lambda}$	Transmissividade em certo comprimento de onda
$\tau(\mu)$	Transmissividade da radiação direta
$\tau_{\Lambda}^{\text{leaf}}$	Transmissividade em certo comprimento de onda para folha
$\tau_{\Lambda}^{\text{stem}}$	Transmissividade em certo comprimento de onda para galhos e tronco
$\tau_{\text{vis}}$	Transmissividade no espectro do visível
$\tau_{\text{iv}}$	Transmissividade no espectro do infravermelho próximo
$\Phi_0$	Densidade de fluxo normal ao feixe [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]
$\Phi$	Densidade de fluxo de uma superfície [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]
$\psi$	Ângulo zenital [rad]
$z$	Distância em termos de número de massa de ar pelo meio atenuante [ $\text{rad}^{-1}$ ]
$k$	Coefficiente de extinção para o meio [ $\text{m}^{-1}$ ]
$\varphi$	Ângulo de elevação solar [rad]
$AZ$	Ângulo azimutal [rad]
$\mu$	Cosseno do ângulo zenital [rad]
$\phi$	Latitude do local [rad]
$\delta$	declinação solar [rad]
$\theta_h$	Ângulo horário

t	Hora [h]
$t_0$	Meio dia solar [h]
DJ	Dia Juliano
H	Ângulo horário do nascer/pôr-do-Sol [rad]
N	Fotoperíodo [rad]
LC	Correção da longitude padrão para a geográfica
ET	Equação de tempo
dr	Distância média Terra-Sol
$J_0$	Constante solar ( $1367 \pm 2\%$ W/m <sup>2</sup> )
$Q_0$	Radiação solar incidente no topo da atmosfera [W/m <sup>2</sup> ]
$Q_g$	Radiação solar global [W/m <sup>2</sup> ]
$D_0$	Componente direta da radiação solar global [W/m <sup>2</sup> ]
$S_0^\downarrow$	Componente difusa da radiação solar global [W/m <sup>2</sup> ]
$S^\uparrow$	Fluxo radiativo difuso ascendente [W/m <sup>2</sup> ]
$S^\downarrow$	Fluxo radiativo difuso descendente [W/m <sup>2</sup> ]
$S_{L_b}^\uparrow$	Fluxo radiativo difuso no sentido ascendente no ponto espacial $L_b$ [W/m <sup>2</sup> ]
$S_{calc}$	Radiação difusa refletida calculada pelo Problema Direto [W/m <sup>2</sup> ]
$S_{exp}$	Radiação difusa refletida experimental [W/m <sup>2</sup> ]
$k_t$	Índice de claridade
$k_d$	Fração da radiação difusa na radiação solar global
BOC	Balanço de Ondas Curtas [W/m <sup>2</sup> ]
$Q_r$	Radiação solar refletida pela superfície [W/m <sup>2</sup> ]
$\alpha$	Coefficiente de reflexão para ondas curtas (Albedo)
$\alpha_{g,VIS}$	Albedo do solo no espectro do visível
$\alpha_{g,IV}$	Albedo do solo no espectro do infravermelho próximo
$\alpha_{g\Lambda}^\mu$	Albedo do solo em certo comprimento de onda para radiação direta
$\alpha_{g\Lambda}^d$	Albedo do solo em certo comprimento de onda para radiação difusa
$\alpha_{sat\Lambda}$	Albedo do solo saturado em certo comprimento de onda
$\alpha_{dry\Lambda}$	Albedo do solo seco em certo comprimento de onda
$\alpha_s(\mu)_\Lambda$	Albedo de espalhamento na direção de $\mu$
$G(\mu)$	Área foliar mais troncos e galhos de uma camada homogênea relativa projetada na direção $\mu$ [m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> ]
$\chi$	Orientação foliar
$\chi^v$	Tendência vertical da orientação foliar
$\chi^h$	Tendência horizontal da orientação foliar

$\beta_{\Lambda}$	Parâmetro de retroespalhamento de folha/tronco e galho para radiação difusa
$\beta_{0\Lambda}$	Parâmetro de retroespalhamento de folha/tronco e galho para radiação direta
$\bar{\mu}$	Profundidade ótica difusa inversa média por unidade de folha e caule [m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> ]
$\mu'$	Cosseno do ângulo de reflexão da radiação solar [rad]
$w_{\text{leaf}}$	Fração de folhas no Dossel
$w_{\text{stem}}$	Fração de galhos e troncos no Dossel
IAG	Índice de área de galhos e troncos
IAF	Índice de área foliar
L	Índice de área foliar e de troncos e galhos cumulativo de um lado apenas aumentando no sentido descendente [m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> ]
$L_b$	Índice de área foliar e de troncos e galhos logo abaixo do dossel (IAF+IAG) [m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> ]
$V_1$	Volume de água da primeira camada de solo
$\theta_{cc}$	Conteúdo de água na capacidade de campo [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]
$\theta_{pmp}$	Conteúdo de água no ponto de murcha permanente [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]
NFE	Número de folhas expandidas
L	Comprimento da folha [m]
W	Largura da folha [m]
AF	Área foliar [m <sup>2</sup> ]
$O_i$	Dado observado
$\bar{O}$	Média dos dados observados
$P_i$	Valor estimado
$\bar{P}$	Média dos valores estimados

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2 OBJETIVO .....</b>	<b>4</b>
2.1 Objetivo Geral .....	4
2.2 Objetivos Específicos .....	4
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>5</b>
3.1 Radiação .....	5
3.1.1 Radiação solar extraterrestre .....	9
3.1.2 Radiação solar global, direta e difusa.....	12
3.1.3 Modelos de balanço de radiação de ondas curtas .....	19
3.2 Métodos Numéricos.....	28
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>33</b>
4.1 Área de Estudo .....	33
4.2 Medidas Radiométricas .....	34
4.2.1 Balanço de radiação de ondas curtas .....	34
4.2.2 Medidas radiação difusa e global .....	34
4.3 Medidas Biométricas .....	34
4.4 Modelo de Transferência Radiativa.....	35
4.4.1 Radiação incidente: frações direta e difusa .....	35
4.4.2 Transferência radiativa pelo dossel .....	36
4.4.3 Condições de contorno .....	38
4.5 Método Numérico.....	39
4.5.1 Formulação explícita do Método das Diferenças Finitas .....	40
4.5.2 Formulação implícita do Método das Diferenças Finitas .....	40
4.5.3 Formulação do <i>Shooting Method</i> .....	41
4.6 Modelagem Inversa .....	43
4.7 Scilab .....	46
4.8 Análise Estatística .....	46
4.8.1 Parâmetros ajustados por modelagem inversa da radiação incidente.....	46

4.8.2 Índices estatísticos utilizados .....	48
4.9 Fluxograma da Metodologia.....	50
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>51</b>
5.1 Modelos de Radiação Solar Direta e Difusa.....	51
5.2 Modelo de Balanço de Radiação Solar.....	61
5.2.1 Modelagem inversa – otimização .....	61
5.2.2 Simulações radiação solar refletida e albedo.....	63
<b>6 CONCLUSÕES.....</b>	<b>72</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>74</b>

# 1 INTRODUÇÃO

O Brasil é extremamente susceptível e vulnerável a eventos climáticos extremos, tanto ambientalmente, quanto socioeconomicamente. Isto ocorre devido a característica de ser um País tropical e com a adaptação da fauna e flora sensíveis às mudanças do clima, de forma que tais fenômenos de diferentes escalas temporais e espaciais podem impactar a biodiversidade. Ademais, no atual estágio de desenvolvimento do País, a desigualdade social torna grande parte da população vulnerável aos efeitos causados pelos extremos climáticos. Destacam-se as populações rurais e os habitantes pobres das periferias das cidades brasileiras e das áreas costeiras com baixas elevações. Esses eventos afetam também a economia brasileira, que tem forte dependência dos recursos naturais renováveis, principalmente, agricultura, hidroeletricidade, biocombustíveis, bioenergia, energia eólica e energia solar (NOBRE, 2008). Em especial, a participação da cana-de-açúcar, objeto deste trabalho, no contexto da economia nacional, que nas últimas décadas tem aumentado em virtude da importância dada à questão energética mundial, além de seus produtos se destacarem como *commodities* agrícola (TISOT, 2009). Atualmente, a cana-de-açúcar é o terceiro maior cultivo brasileiro em área plantada, atrás apenas da soja e do milho. Em 2016, os canaviais ocupavam 10,5 milhões de hectares, ou seja, 13,5% do total nacional de área plantada no país (IBGE, 2017).

A simulação dos processos de ecossistema terrestre, por meio de modelos numéricos possíveis de serem acoplados aos Modelos de Circulação Geral da Atmosfera (MCGA) e Modelos Atmosféricos Regionais, auxilia no diagnóstico e prognóstico mais preciso do clima e do tempo. Esses modelos descrevem os processos da interação com a atmosfera e as mudanças transientes que ocorrem na composição e na estrutura da vegetação. Estudos climáticos tem grande dependência do desempenho e da eficaz representatividade do MCGA. Porém, os estudos científicos sistemáticos para compreender o comportamento entre biosfera e atmosfera somente foram iniciados há cerca de quarenta anos (ALBUQUERQUE NETO, 2016). Ainda assim, é identificada a constante e atual necessidade de aprimorar o entendimento e a representação desses processos, devido ao território brasileiro, como um todo, ter apresentado diferentes transformações no padrão espacial de uso e cobertura da Terra nas últimas décadas (CUNHA et al., 2013a).

Atualmente, existe uma diversidade de modelos que representam o sistema Biosfera-Atmosfera e estes têm por objetivo melhorar a condição de limite inferior dos modelos atmosféricos, por tentar avaliar com precisão e exatidão a interação superfície-atmosfera. Os modelos de interação entre biosfera e atmosfera variam entre aqueles que simulam apenas a troca de *momentum*, energia e vapor d'água, como é o caso do *Simplified Simple Biosphere Model* (SSiB) (XUE et al., 1991), modelos mais sofisticados, como o *Integrated Biosphere Simulator Model* (IBIS) e o *Community Land Model* (CLM), que inclui, além de processos listados acima, o ciclo do carbono e nutrientes terrestre e a dinâmica da vegetação (CUNHA et al., 2013b).

Nas últimas décadas, houve aumento de modelos numéricos que visam descrever os processos globais que ocorrem na biosfera. Porém, o desenvolvimento desses modelos separadamente fez com que a relação entre muitos desses processos fosse inadequadamente interpretada, o que dificulta a compreensão do que ocorre na biosfera e sua influência no sistema climático. Muitos dos atuais modelos de biosfera são baseados no estado de equilíbrio do ecossistema e que, na verdade, deveriam ser capazes de simular a completa dinâmica do ecossistema terrestre (importante para identificar as respostas transientes às variações do clima, uso e ocupação da Terra e aumento da concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico), além da dependência do tempo (importante para entender as consequências de ações antropogênicas) (FOLEY et al., 1996).

Em especial, o módulo de radiação solar é relevante ao considerar modelos dinâmicos, devido ser o principal mecanismo de aporte energético para um ecossistema. A distribuição da radiação solar no interior do dossel da vegetação controla toda a dinâmica de crescimento de plantas por meio da parcela absorvida pelo mecanismo de fotossíntese, e isso influencia a disponibilidade de água e nutrientes no solo, pelos mecanismos de troca de calor e massa. Essa distribuição é determinada por alguns fatores, como por exemplo, pela disponibilidade de radiação solar no topo do dossel e seu direcionamento (direto e difuso), pela composição do espectro de radiação solar, pela distribuição da área foliar, pelas características óticas de folhas e troncos, entre outros. Este tema de pesquisa tem vasta aplicabilidade com interesses multidisciplinares no desenvolvimento de modelos de clima e de crescimento de vegetação (MELO e BRASIL JR., 2002).

A modelagem do balanço de radiação solar para vegetação pode ser tratada de duas formas diferentes, dependendo da escala de aplicabilidade do modelo desenvolvido. Para modelos de clima, têm sido propostas parametrizações com base em formulação globalizada obtida da integração da atenuação da radiação pelo meio até o solo. Esta abordagem é conhecida como aproximação

*two stream* e baseia-se em formulação de atenuação e do espalhamento da radiação no sentido atmosfera-solo para camadas homogêneas. Diversos modelos de balanço de radiação solar utilizam-se dessa abordagem e, devido ao nível de complexidade apresentado, muitas vezes impossibilita a sua utilização no dia-a-dia em diversas pesquisas. Com isso, para aplicações simples, existem outras proposições como, por exemplo, um modelo simplificado de resolução de transferência radiativa que trata a vegetação como um bloco homogêneo com albedo único, denominado *Big Leaf*, ou modelos que tem a base no sensoriamento remoto (MELO e BRASIL JR., 2002).

Neste trabalho será implementado o modelo de transferência radiativa proposto por diversos autores, dentre eles Coakley e Chýlek (1975) e Dickinson (1983), no ambiente de modelagem matemática Scilab com abordagem de solução numérica de diferenças finitas a fim de avaliá-lo para a área de estudo.

Este modelo é de base mecanística, ou seja, consiste em tentar descrever seu funcionamento na forma de conjunto de equações baseados na visão estrutural do sistema. Isso faz com que o modelo tenha parâmetros que tem fundamento físico, químico ou biológico, que são adequados para a representação das condições utilizadas para desenvolvê-lo. Este é diferente de modelos empíricos que normalmente se usam de curvas com base em observações (medidas) para ajustar variáveis de causa e efeito. Seus coeficientes, na maioria das vezes, não apresentam significado, sendo apenas ajustes matemáticos.

Desta forma, esse modelo irá representar determinada região, bioma ou ecossistema diferentes, quando os parâmetros do modelo estiverem ajustados para as condições locais específicas. A esses ajustes é dado o nome de calibração, que é um conjunto de simulações com o objetivo de afinar os valores dos coeficientes do modelo para que, se fisicamente consistentes, este descreva o que é observado. A calibração permite estudar cada caso de forma detalhada, para que os modelos sejam melhorados conforme as necessidades identificadas e os recursos disponíveis (FONTES, 2015).

No capítulo 2, são enumerados os objetivos gerais e específicos definidos na proposição do problema. No capítulo 3, é apresentada a revisão bibliográfica utilizada para o desenvolvimento desse trabalho. No capítulo 4, é explicada a metodologia utilizada para o desenvolvimento do modelo no ambiente supramencionado e suas abordagens de avaliação. O capítulo 5 é reservado para a apresentação dos resultados obtidos e discussão dos mesmos. Finalmente, no capítulo 6 é explicitada a conclusão a partir dos resultados adquiridos.

## 2 OBJETIVO

### 2.1 Objetivo Geral

Avaliar um modelo de transferência radiativa baseado na aproximação *two-stream* a partir da solução por diferenças finitas combinado com *Shooting Method* aplicado em cultura de cana-de-açúcar.

### 2.2 Objetivos Específicos

Ajustar e avaliar dois modelos empíricos de estimativa das componentes direta e difusa da radiação solar incidente para a área de estudo: modelo polinomial de 3º e modelo logístico;

Implementar o modelo de transferência radiativa em ambiente aberto para computação numérica (Scilab) pelo Método das Diferenças Finitas combinado com o *Shooting Method*.

Calibrar os parâmetros do modelo para cultura de cana-de-açúcar com base em modelagem inversa, usando o Método de Luss-Jaakola;

Validar a solução do modelo com observações das componentes do balanço de radiação de ondas curtas em dossel de cana-de-açúcar.

## 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 3.1 Radiação

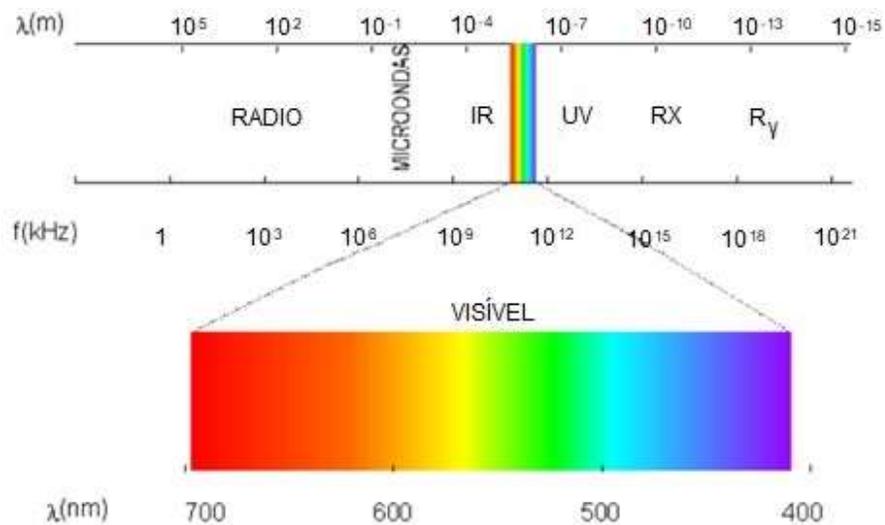
A radiação eletromagnética é uma forma de energia derivada de campos oscilantes magnéticos e eletrostáticos e é capaz de se transmitir através do vácuo. A capacidade de interagir com a radiação é uma propriedade intrínseca de sólidos, líquidos e gases e está sempre associada a mudanças no estado energético de átomos e moléculas. Nas moléculas, a energia da radiação é derivada da vibração e rotação de átomos individuais dentro da estrutura molecular. O princípio da conservação de energia é fundamental para a origem material da radiação (MONTEITH e UNSWORTH, 2013).

A energia radiativa é transferida por meio de fótons, que são definidos de forma similar ao quantum na radiação eletromagnética emitida em determinado comprimento de onda  $e$ , que se propagam na velocidade da luz ( $c = 3 \times 10^8$  m/s no vácuo). Os fótons se comportam tanto como partículas, quanto como ondas (dualidade onda-partícula). A abordagem a ser utilizada depende do processo estudado: para trocas de energia, normalmente, utiliza-se a abordagem de onda, enquanto para a fotossíntese utiliza-se o tratamento de partículas. Os fótons podem ser absorvidos ou emitidos pela matéria como resultado de transições dos quanta nos níveis de energia nos átomos ou mudanças dos níveis de energia vibracional ou rotacional nas moléculas. A energia dos fótons ( $e$ , J) é relacionada diretamente a sua velocidade de propagação e inversamente proporcional ao comprimento de onda de radiação, sendo descrita pela lei de Planck:

$$e = \frac{hc}{\lambda} \quad (3.1)$$

em que,  $h$  é a constante de Planck ( $6,63 \times 10^{-34}$  J s),  $c$  é a velocidade da luz no vácuo (m/s) e  $\lambda$  é o comprimento de onda do fóton (m). A energia transferida por um único fóton não traz relevância, porém por um mol de fótons traz e pode ser obtida ao multiplicar  $e$  pelo número de Avogadro ( $6,023 \times 10^{23}$ ) (CAMPBELL e NORMAN, 1997; MONTEITH e UNSWORTH, 2013).

A organização do total de variações de energia e comprimento de onda dos fótons é denominado de espectro eletromagnético (CAMPBELL e NORMAN, 1997). Ou seja, as mudanças no estado de energia dos elétrons atômicos estão associadas a espectros de linha confinados a uma frequência específica ou conjunto de frequências (MONTEITH e UNSWORTH, 2013). Este espectro é dividido em bandas de acordo com a fonte dos fótons ou a interação dos mesmos com os corpos conforme apresentado na Figura 3.1 (IQBAL, 1983).



**Figura 2.1** Espectro eletromagnético

Fonte: Rivera (2018)

As linhas espectrais tendem a se tornar bandas de emissão ou absorção, quando um corpo trabalha com muitas transições de fótons em níveis de energia próximos. Quando isso ocorre em número infinito de transições espaçadas ao longo do espectro eletromagnético, ele é considerado um radiador ou absorvente perfeito, denominado corpo negro (CAMPBELL e NORMAN, 1997).

Depois que a energia é absorvida por um corpo, a quantidade de energia radiante emitida por um átomo ou molécula individual do mesmo é igual à diminuição da energia potencial de seus constituintes (MONTEITH e UNSWORTH, 2013). Segundo Stefan-Boltzmann, esse corpo emite radiação no espectro proporcional a quarta potência de sua temperatura:

$$E = \varepsilon\sigma T^4 \quad (3.2)$$

em que  $E$  é a densidade de fluxo de energia emitida ( $\text{W}/\text{m}^2$ ),  $\varepsilon$  é a emissividade do corpo,  $T$  é a temperatura (K) e  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann ( $5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ ). Emissividade de um corpo é a fração de emitância relativa a um corpo negro a um dado comprimento de onda emitido por um material (CAMPBELL e NORMAN, 1997). Dessa forma, no caso dos corpos negros, a emissividade é igual a 1 (IQBAL, 1983; PEREIRA et al., 2007). O corpo negro não existe na prática, porém há corpos, como o Sol e a Terra, que irradiam aproximadamente como corpos negros em determinadas bandas do espectro (CAMPBELL e NORMAN, 1997).

Wien propôs a lei que relaciona o máximo comprimento de onda ( $\lambda_{\text{máx}}$ ,  $\mu\text{m}$ ), onde ocorre a máxima emissão de radiação eletromagnética do corpo negro e sua temperatura absoluta ( $T$ , K) (CAMPBELL e NORMAN, 1997; IQBAL, 1983; LIOU, 2002):

$$\lambda_{\text{máx}} = \frac{2897,8}{T} \quad (3.3)$$

Devido à temperatura média da sua superfície (6000 K), a máxima emissão do Sol ocorre para o comprimento de onda de 500 nm (Lei de Wien) e seu espectro de emissão apresenta comprimentos menores que 4000 nm (em sua grande maioria). Assim, denomina-se a radiação emitida pelo Sol (radiação solar) de radiação de ondas curtas. O espectro de emissão da superfície terrestre é caracterizado por comprimentos de onda maiores que 4000 nm, com máxima emissão em aproximadamente 10000 nm, que se encontra na faixa do espectro do infravermelho térmico. Dessa forma, a radiação terrestre também é conhecida como radiação térmica ou radiação de ondas longas (CAMPBELL e NORMAN, 1997; GOUDRIAAN, 1977; IQBAL, 1983; PEREIRA et al., 2007).

Além de absorver e emitir, a radiação interage com um corpo pelos processos de reflexão e transmissão. O tipo de interação que ocorrerá entre a radiação incidente e a matéria pode depender da direção de origem da radiação, da direção na qual a superfície está sendo vista e do comprimento de onda dessa radiação. Quanto à dependência do comprimento de onda, essas interações são chamadas de: emissividade, absortividade, refletividade e transmissividade do corpo (CAMPBELL e NORMAN, 1997).

Como a energia que incide sobre o corpo só pode ser absorvida, refletida ou transmitida, ela pode ser particionada da seguinte forma:

$$\gamma_{\Lambda} + \rho_{\Lambda} + \tau_{\Lambda} = 1 \quad (3.4)$$

em que,  $\gamma_{\Lambda}$  é absorvidade em certo comprimento de onda,  $\rho_{\Lambda}$  é a reflectividade em certo comprimento de onda e  $\tau_{\Lambda}$  é transmissividade em certo comprimento de onda, sendo a fração do fluxo radiante incidente a um dado comprimento de onda absorvido, refletido e transmitido por um material, respectivamente (CAMPBELL e NORMAN, 1997). Como para um corpo negro  $\gamma_{\Lambda} = 1$ , conclui-se para esse caso que  $\rho_{\Lambda} = \tau_{\Lambda} = 0$  (IQBAL, 1983; LIOU, 2002).

Segundo Dickinson (1983), toda a radiação que é desviada por um corpo, logo a reflexão e a transmissão, pode ser denominada de espalhamento e, a soma dos coeficientes de refletância e de transmitância do corpo para cada banda de comprimento de onda é o coeficiente de espalhamento ( $\omega$ ) (DICKINSON, 1983; YANAGI e COSTA, 2011).

$$\omega_{\Lambda} = \rho_{\Lambda} + \tau_{\Lambda} \quad (3.5)$$

A absorção e a emissão de radiação estão relacionadas pelo mesmo processo de mudança do status de energia de emitir ou absorver átomos ou moléculas. Dessa forma, a lei de Kirchhoff expressa o princípio de que, com isso, a emissividade e absorvidade de um corpo são iguais para o mesmo comprimento de onda (LIOU, 2002).

$$\varepsilon_{\Lambda} = \gamma_{\Lambda} \quad (3.6)$$

É importante reconhecer que os valores de absorvidade ou emissividade representam apenas a fração possível de absorção ou emissão em determinado comprimento de onda e não dizem nada sobre a radiação estar sendo ou não absorvida ou emitida ativamente neste comprimento de onda (CAMPBELL e NORMAN, 1997).

Para saber como a radiação é particionada entre as diferentes interações com a matéria, é necessário conhecer a densidade do fluxo de radiação, também conhecido como irradiância. Con-

siderando uma pequena área exposta a uma fonte pontual de radiação, de forma que os feixes incidam sobre a superfície quase paralelos, cuja propriedade em ambiente natural só se aplica a fonte solar, a irradiância da superfície depende da sua orientação em relação ao feixe. Com isso, Lambert propôs a lei dos Cossenos de Lambert:

$$\Phi = \Phi_0 \cos\psi \quad (3.7)$$

em que,  $\Phi_0$  é a densidade de fluxo normal ao feixe ( $\text{W}/\text{m}^2$ ),  $\Phi$  é a densidade de fluxo de uma superfície ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) e  $\psi$  é o ângulo entre o feixe de radiação e a normal ao plano do horizonte (zênite), que é referido como ângulo zenital (rad) (CAMPBELL e NORMAN, 1997; IQBAL, 1983; LIOU, 2002).

Porém, quando a radiação paralela é emitida de sua fonte e atravessa um meio homogêneo que atenua o feixe, a irradiância será menor de acordo com a lei de Beer:

$$\Phi = \Phi_0 \exp(-kz) \quad (3.8)$$

em que,  $\Phi_0$  é a densidade de fluxo de radiação sem atenuação,  $z$  é a distância medida em termos de número de massa de ar que a radiação percorre no meio atenuante ( $z = 1/\cos\psi$ ) e  $k$  é o coeficiente de extinção para o meio ( $\text{m}^{-1}$ ).  $\cos\psi$  é definido no item 3.1.1. Entretanto, essa lei aplica-se estritamente para casos em que as bandas são estreitas o suficiente para que  $k$  permaneça relativamente constante para a banda. Essa lei é comumente utilizada para descrever a atenuação sofrida da radiação solar pela atmosfera (CAMPBELL e NORMAN, 1997; IQBAL, 1983).

### 3.1.1 Radiação solar extraterrestre

A radiação solar, ou de ondas curtas, que incide sobre a superfície depende tanto da distribuição da radiação emitida pelo Sol, e que incide no topo da atmosfera, quanto na sua interação com os componentes da atmosfera. Dessa forma, primeiramente, é necessário determinar a energia radiativa que incide no topo da atmosfera. Três fatores influenciam na variação da irradiância solar incidente no topo da atmosfera ao longo do ano e do dia: a forma da Terra, a translação associada

à inclinação do eixo de rotação (ambos os fatores influenciam no ângulo de incidência dos raios solares na Terra) e a distância Terra-Sol (VAREJÃO-SILVA, 2006).

A localização do Sol na abóbada celeste pode ser descrita por meio do seu ângulo zenital ( $\psi$ , rad) ou do ângulo de elevação solar ( $\varphi$ , rad), ângulo que o Sol faz com a linha do horizonte, e do seu ângulo azimutal ( $AZ$ , rad), ângulo do verdadeiro norte ou sul, medido no plano horizontal. Dessa forma, os ângulos de elevação solar e zenital são complementares (CAMPBELL e NORMAN, 1997; IQBAL, 1983; PEREIRA et al., 2007):

$$\varphi + \psi = \frac{\pi}{2} \quad (3.9)$$

O ângulo zenital e o ângulo de elevação solar, na escala subdiária, dependem da hora, do dia e da latitude do local, sendo expresso pela equação:

$$\mu = \cos\psi = \sin\varphi = \sin\phi \sin\delta + \cos\phi \cos\delta \cos\theta_h \quad (3.10)$$

em que,  $\phi$  é a latitude do local (rad),  $\delta$  é a declinação solar (rad),  $\theta_h$  é o ângulo horário [ $\theta_h = 0,2618 (t - t_0)$ ], sendo  $t$  é a hora (h) e  $t_0$  é o meio dia solar (h) (CAMPBELL e NORMAN, 1997; IQBAL, 1983). O ângulo zenital, assim como o ângulo de elevação solar apresentam valor de zero para o período entre o pôr do sol de um dia ao nascer do Sol do dia seguinte. A declinação solar é o ângulo formado entre o equador terrestre e a linha imaginária que contém o plano do sol. Dessa forma, varia de  $+23,45^\circ$  no solstício de verão do Hemisfério Norte (H.N.) a  $-23,45^\circ$  no solstício de inverno do H.N. e pode ser calculado (em radiano) conforme (CAMPBELL e NORMAN, 1997; VAREJÃO-SILVA, 2006):

$$\delta = 0,409 \sin\left[\frac{2\pi}{365} DJ - 1,39\right] \quad (3.11)$$

em que,  $DJ$  é o dia Juliano, que representa o ano em dias corridos a partir de 1º de janeiro,  $DJ = 1$ , até o dia 31 de dezembro,  $DJ = 365$  (IQBAL, 1983). Essa fórmula parte da aproximação que a Terra é uma esfera (VAREJÃO-SILVA, 2006).

O fotoperíodo ( $N$ , rad) é função do ângulo horário do nascer/pôr-do-Sol ( $H$ , rad), conforme (PEREIRA et al., 2007; VAREJÃO-SILVA, 2006):

$$H = \arccos(-tg\delta tg\phi) \quad (3.12)$$

$$N = \frac{24H}{\pi} \quad (3.13)$$

A hora do meio dia solar ( $t_0$ , h) é calculada pela correção da hora legal, baseada no meridiano padrão que, no caso deste estudo, é o meridiano central de Brasília (45°W). Ou seja, a hora legal do local na maioria das vezes é diferente da hora solar (NICÁCIO, 2002). Dessa forma, a hora em que o sol se encontra no zênite local é dado por:

$$t_0 = 12 - LC - ET \quad (3.14)$$

em que,  $LC$  é a correção da longitude padrão para a geográfica e  $ET$  é a equação de tempo.  $LC$  é + 4 minutos ou 1/15 de hora para cada grau a leste do meridiano padrão ou - 4 minutos ou 1/15 de hora para cada grau a oeste do meridiano padrão. Meridianos padrão são os que dividem os fusos-horários da Terra, ou seja, a cada 15° tem-se um meridiano padrão dividindo a Terra de -12 horas a +12h do marco zero, o meridiano de Greenwich. Geralmente, a correção vai de -7,5° a +7,5° para cada lado do meridiano padrão, porém, isto pode variar se houver limites políticos.  $ET$  é uma correção de 15 a 20 minutos que depende do dia juliano e pode ser calculado a partir (CAMPBELL e NORMAN, 1997):

$$ET = \frac{(-104,7senf + 596,2sen2f + 4,3sen3f - 12,7sen4f - 429,3cosf - 2,0cos2f + 19,3cos3f)}{3600} \quad (3.15)$$

em que,  $f = 279,575 + 0,98565 DJ$ .

O ângulo azimutal pode ser calculado conforme:

$$\cos AZ = \frac{-(sen\delta - cos\psi sen\phi)}{cos\phi sen\psi} \quad (3.16)$$

AZ é medido a partir do sul e aumenta em sentido anti-horário de forma que  $\pi/2$  é leste (CAMPBELL e NORMAN, 1997).

A distância média Terra-Sol ( $dr$ ) varia de 144 milhões km, quando se encontram mais próximos, denominado Periélio, ocorrendo entre 2 e 7 de janeiro, a 154 milhões km, momento em que estão mais afastados, por volta de 2 a 7 de julho, e é denominado Afélio. Isto se deve à trajetória elíptica da Terra em torno do Sol (PEREIRA et al., 2007). Dessa forma, é necessário calcular a distância relativa Terra-Sol para cada dia do ano por meio da equação de correção (IQBAL, 1983):

$$dr = 1 + 0,033 \cos\left(DJ \frac{2\pi}{365}\right) \quad (3.17)$$

E, finalmente, a radiação solar incidente no topo da atmosfera ( $Q_0$ , W/m<sup>2</sup>) pode ser calculada da seguinte forma (IQBAL, 1983):

$$Q_0 = J_0 dr \mu \quad (3.18)$$

em que,  $J_0$  é a constante solar, a densidade de fluxo de radiação solar incidente sobre uma superfície plana de área unitária, perpendicular aos raios solares, no topo da atmosfera e a uma distância média Terra-Sol (1 Unidade Astronômica – 1UA). A determinação do valor da constante solar tem sido objeto de muitas pesquisas e neste trabalho será usado o valor de  $1367 \pm 2\%$  W/m<sup>2</sup> (IQBAL, 1983; PEREIRA et al., 2007).

### 3.1.2 Radiação solar global, direta e difusa

A radiação pode ser classificada inicialmente pelo seu comprimento de onda, ou seja, em duas regiões espectrais: radiação de ondas curtas, quando o comprimento de onda é menor que 4000 nm, e radiação de ondas longas, quando o comprimento de onda é maior que 4000 nm. Essa é uma classificação amplamente utilizada, pois baseada nela consegue-se uma diferenciação entre a radiação emitida por corpos na Terra e a radiação emitida pelo Sol. Isso ocorre, pois, o Sol tem uma amplitude do espectro de emissão de radiação quase inteiramente menor que 4000 nm. Uma

pequena parcela é encontrada dentro do espectro de ondas longas. Porém, comparado com a radiação emitida pelos corpos, a contribuição da radiação solar neste espectro pode ser negligenciada. O tratamento da radiação de ondas longas, também chamado de radiação térmica por estar no espectro denominado infravermelho térmico, é mais complexo do que o de ondas curtas, pois todos os corpos emitem radiação no espectro das ondas longas (GOUDRIAAN, 1977; VAREJÃO-SILVA, 2006).

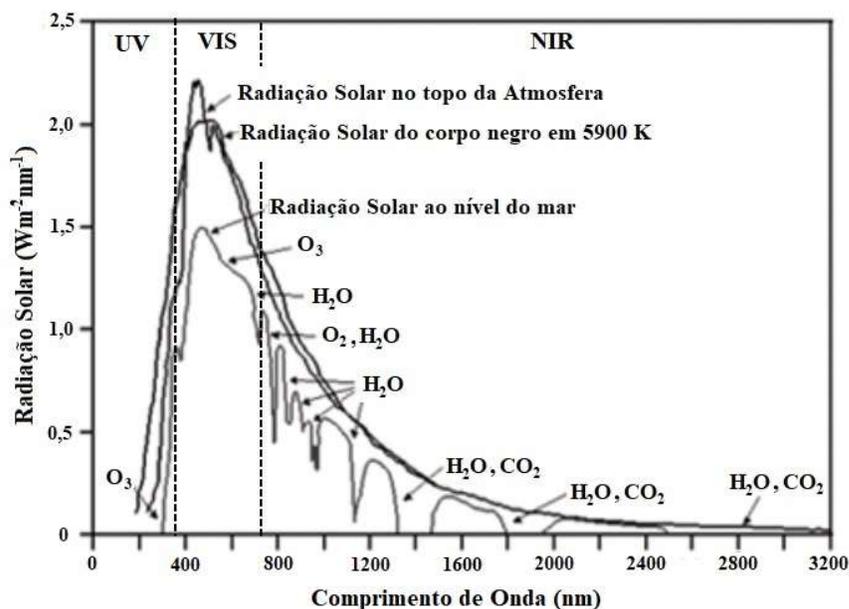
Quanto a radiação solar, essa, ao ser transmitida na atmosfera, é modificada em quantidade, qualidade e direção devido ao espalhamento ou à absorção pelos componentes presentes no trajeto até a superfície. Esse processo é chamado de atenuação como descrito anteriormente. Com isso, a radiação incidente na superfície terrestre pode ser dividida inicialmente em três regiões espectrais e, para cada uma dessas regiões, pode ocorrer espalhamento do feixe de radiação direto. Cada região espectral interage de forma diferente com os componentes responsáveis pelo espalhamento, o que resulta em diferentes formas de espalhamento de acordo com as condições do céu (nebulosidade e composição atmosférica). Contudo, simplificações são possíveis (GOUDRIAAN, 1977).

Essa divisão da radiação solar incidente acontece dentro das ondas curtas e que pode ser subdividida em: o ultravioleta, o visível e o infravermelho próximo. No nível do mar, a região do ultravioleta (comprimento de onda de 100 a 400 nm), que pode ser dividido em UV<sub>a</sub>, UV<sub>b</sub> e UV<sub>c</sub>, representa em torno de 3% do total da energia radiativa solar, pois o oxigênio absorve quase toda a radiação nessa banda para formação do ozônio (UV<sub>c</sub> e parte do UV<sub>b</sub>) e, pode ser negligenciada ao comparar com a contribuição das outras bandas (GOUDRIAAN, 1977; PORFIRIO et al., 2012; VAREJÃO-SILVA, 2006). Entretanto, apesar de ser desprezível comparado com a radiação global observada para o mesmo horário, Porfirio et al. (2012) encontrou o valor máximo horário de radiação ultravioleta (UV) de 26,9 W m<sup>-2</sup> para a região de Maceió/AL no mês de janeiro próximo ao meio dia solar.

Dessa forma, a composição do espectro da radiação solar pode ser aproximada pela razão entre a radiação incidente visível e infravermelho próximo. Segundo Goudriaan (1977), para dias sem nebulosidade, a incidência de radiação é 50% visível (VIS) e 50 % infravermelho próximo (IV), aproximadamente. Para dias encobertos, a aproximação da incidência de radiação aumenta para 60% a favor da banda do visível (GOUDRIAAN, 1977). O gráfico espectral que apresenta a radiação solar incidente no topo da atmosfera comparada a radiação solar incidente à superfície é apresentado na Figura 3.2.

Com base em medidas realizadas em Botucatu, São Paulo, no período de 2001 a 2004, Escobedo et al. (2009) avaliaram as frações da radiação visível, infravermelho próximo e ultravioleta da radiação solar global em médias horárias pelo índice de claridade ( $k_t$ ), este definido posteriormente neste trabalho. Para a primeira classificação,  $k_t \leq 0,35$ , Escobedo et al. (2009) encontrou as frações de 5,03, 52,74 e 43, 23 % para a radiação ultravioleta, visível e infravermelho próximo, respectivamente. Para  $0,35 < k_t \leq 0,55$ , as frações foram 4,43, 49,29 e 46,28 % para a radiação UV, VIS e IV, respectivamente. Nesta mesma ordem de apresentação, as frações para  $0,55 < k_t \leq 0,65$  foram 4,11, 48,82 e 47,07 % e, para  $k_t > 0,65$ , as frações apresentadas foram 4,04, 49,00 e 46,96 %.

Escobedo et al. (2010) avaliaram a média horária dos dados obtidos para as frações da radiação visível, infravermelho próximo e ultravioleta da radiação solar global coletada para o mesmo local e período do trabalho supracitado. Os resultados desse trabalho apresentaram que o percentual de radiação UV na radiação solar global para a média horária ficou entre 4,17 e 4,49 %, o percentual de radiação VIS foi entre 48,66 e 50 %, e o percentual da radiação no espectro IV ficou entre 46,07 e 46,88 %.



**Figura 3.2** Curvas do espectro de emissão de radiação pelo Sol assumindo um corpo negro à uma temperatura de 5900 K, a radiação solar que atinge o topo da atmosfera e a radiação solar incidente na superfície ao nível do mar apresentando as bandas de absorção da radiação incidente pelos diferentes gases constituintes da atmosfera.

Fonte: Echer et al. (2006)

Outra divisão necessária para a radiação solar incidente trata da distribuição geométrica dos raios solares em dois grupos: radiação direta e radiação difusa. A radiação direta é caracterizada por não sofrer nenhuma mudança de direção por componentes da atmosfera no seu trajeto até a superfície, logo apresenta inclinação conhecida, a mesma inclinação do Sol. A radiação difusa é a que sofre algum tipo de espalhamento ao entrar em contato com componentes presentes na atmosfera e parte dessa radiação retorna ao espaço enquanto a outra parte incide à superfície com diferentes ângulos. A radiação difusa pode ser tratada com base em duas suposições: a primeira supõe que o céu tem uma irradiância uniforme, que resulta em radiação descendente isotrópica, denominada distribuição de céu encoberto uniforme, a segunda, denominada de distribuição de céu encoberto padrão, que provém de uma abordagem empírica proposta por Moon e Spenser (1942 apud GOUDRIAAN, 1977) e verificada por Grace (1971 apud GOUDRIAAN, 1977).

A soma da densidade do fluxo de energia das radiações direta e difusa é conhecido como radiação solar global. Essa irradiância incidente à superfície ( $Q_g$ ,  $W/m^2$ ) é a radiação solar incidente no topo da atmosfera menos a parcela que foi atenuada e não chegou à superfície. Esse cálculo é proposto por diversos autores de diferentes formas desde modelos teóricos até empíricos, que calculam a radiação solar global até os que calculam as componentes direta e difusa separadamente. Alguns deles serão apresentados a seguir. Outros modelos podem ser encontrados em Iqbal et al. (1983), Campbell e Norman (1977), Mghouchi et al. (2015), entre outros. A escolha da melhor abordagem depende do propósito do trabalho de acordo com o nível de detalhamento exigido para o estudo.

Mghouchi et al. (2015) apresentaram o resultado da comparação de quatro modelos feita com dados coletados em 2012 pela estação laboratório de energia meteorológica da faculdade de ciências da cidade de Tetuan, Universidade Abdelmalek Essaadi, norte do Marrocos. Os resultados obtidos no artigo foram analisados através da comparação dos índices estatísticos MBE (sigla em inglês para Erro Médio de Tendência), RMSE (sigla em inglês para Raiz do Quadrado Médio do Erro), MAPE (sigla em inglês para Erro Percentual Absoluto Médio) e  $r^2$  (coeficiente de determinação). Mghouchi et al. (2015) ranquearam os modelos de acordo com a avaliação dos índices e, concluíram que o modelo mais preciso e exato é o de Ghouard, seguido por Perrin-Brichambaut, Bird and Hulstrom e Capderou.

O modelo proposto por Ghouard et al. (1977 apud MGHOUCHI et al., 2015) é baseado na avaliação de fatores de distúrbio, que dependem das condições da atmosfera e de parâmetros astronômicos. Nesse modelo, a equação da densidade de radiação solar direta não considera explicitamente o fluxo de radiação solar que é absorvido ou espalhado pelos componentes da atmosfera, sendo eles, vapor d'água, aerossóis, ozônio, entre outros, e a densidade de radiação solar difusa vem de todo o espaço sem orientação específica. O modelo proposto por Perrin Brichambaut (1975 apud MGHOUCHI et al., 2015) considera apenas parâmetros astronômicos e puramente empíricos para condições atmosféricas.

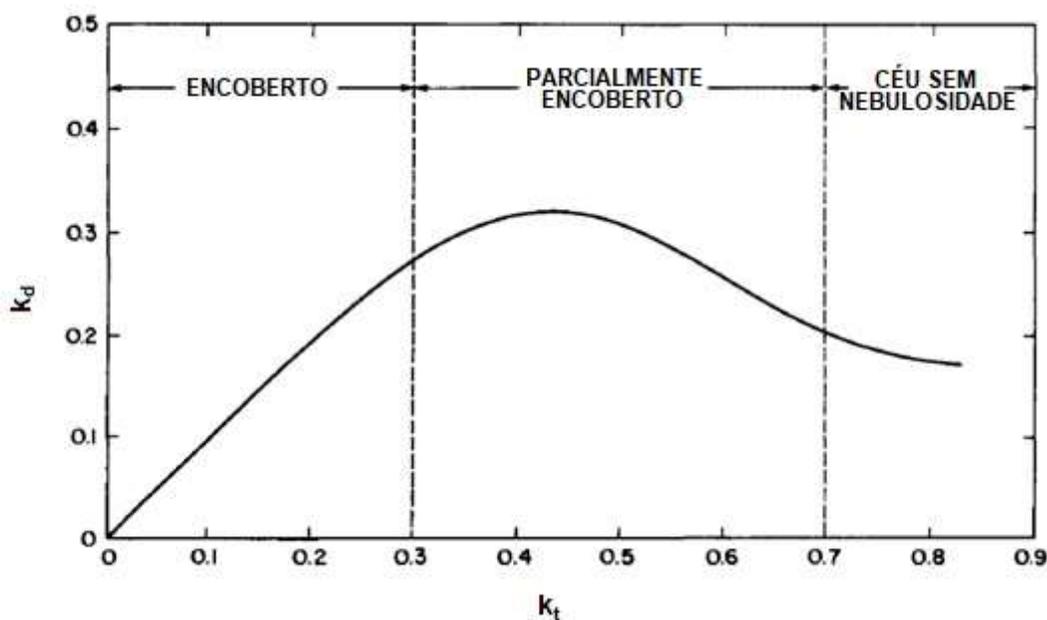
O modelo de Bird e Hulstrom, calcula a radiação direta como uma função da absorção e transmitância pelos componentes atmosféricos tais como ozônio, gás carbônico, vapor d'água e aerossóis. Também calcula a radiação difusa horizontal ao nível do solo por uma combinação de três componentes individuais correspondentes ao espalhamento Rayleigh após a primeira passagem pela atmosfera, o espalhamento de aerossóis após a primeira passagem pela atmosfera e os processos de múltiplas reflexões entre o solo e o céu. O último modelo apresentado por Mghouchi et al. (2015), o modelo de Capderou, usa o fator de turbidez de Linke para calcular os componentes de radiação solar direta e difusa recebidos no plano horizontal. Neste modelo, a absorção e difusão causadas pelos constituintes atmosféricos são expressas por vários fatores de turbidez (MGHOUCHI et al., 2015).

Há também métodos para estimar a radiação difusa horária baseados em medidas ou estimativas de radiação solar global pois estas são comumente observadas. Esses modelos têm como premissa que as condições solares de um determinado local podem ser caracterizadas empiricamente através do nível de nebulosidade e elevação solar. Ou seja, sob céu sem nebulosidade e dada composição da atmosfera, a radiação solar difusa depende apenas da elevação solar. A influência da nebulosidade vai aumentando conforme aumenta a cobertura por nuvens e sua distribuição geométrica em relação ao raio solar. Entretanto, é possível determinar a radiação solar difusa horária através da razão ( $k_t$ ) entre a radiação solar global ( $Q_g$ , W/m<sup>2</sup>) e a radiação solar incidente no topo da atmosfera ( $Q_0$ , W/m<sup>2</sup>) horárias (IQBAL, 1983).

$$k_t = \frac{Q_g}{Q_0} \tag{3.19}$$

Esta razão, em geral, indica o grau de nebulosidade do céu e é denominada índice de claridade. Ou seja, um valor baixo do índice de claridade implica que apenas uma pequena parte da radiação solar atinge o solo, o que significa um céu coberto por nuvens (encoberto). Ainda há a possibilidade de o índice de claridade representar a elevação solar. Isto é observado para baixa elevação solar, quando se tem um maior caminho óptico, resultando em  $k_t$  mais baixo que o esperado para determinada cobertura do céu. Já um valor alto do índice de claridade significa um céu predominantemente ensolarado (PAULESCU e BLAGA, 2016).

Com isso, Iqbal (1983) apresentou uma classificação para o potencial grau de nebulosidade da atmosfera através da razão  $k_t$ , em que céu sem nebulosidade é determinado por  $k_t \geq 0,7$ , céu parcialmente encoberto para  $0,3 \leq k_t < 0,7$  e céu encoberto para  $k_t < 0,3$  (Figura 3.3).



**Figura 2.3** Variação da radiação difusa diária ( $k_d$ ) por  $k_t$ .  
Fonte: Iqbal (1983, p.253)

Há outras possíveis classificações para a divisão da qualidade do céu principalmente pela influência dos tipos de nuvens, considerando sua altura, número de camadas e espessura. Por exemplo, Lima (1996 apud NICÁCIO, 2002) utiliza a relação de  $k_t < 0,25$  para dias com céu totalmente encoberto,  $0,25 \leq k_t \leq 0,50$  para dias parcialmente nublados e  $k_t > 0,50$  em dias de céu limpo (NICÁCIO, 2002).

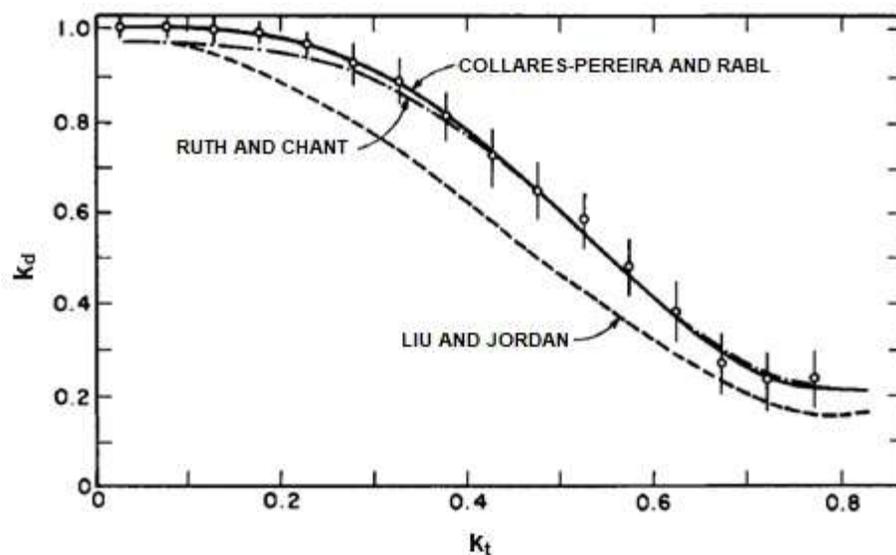
Desta forma, a quantidade de radiação global em um determinado horário pode ser um indicador de parcela difusa dessa radiação expressa pela razão a seguir (IQBAL, 1983):

$$k_d = \frac{S_0^\downarrow}{Q_g} \quad (3.20)$$

em que,  $S_0^\downarrow$  é a componente difusa da radiação solar global incidente no topo do dossel vegetal ( $\text{W/m}^2$ ).

Um dos métodos mais simples de estimativa da radiação difusa é através dos melhores ajustes existentes entre  $k_d$  e  $k_t$  pela elaboração de diagramas de dispersão entre estas razões, com a finalidade de se observar o comportamento destes índices. Com isso, a partir das análises de regressão, é obtida a melhor relação existente (EFTIMIE, 2011). As características dessa dispersão sofrem a influência, principalmente, dos tipos de nuvens, considerando sua altura, número de camadas e espessura (NICÁCIO, 2002). Um exemplo dessa representação é dado por Iqbal (1983) para a radiação difusa diária (Figura 3.4).

Como ele mesmo aborda, é possível desenvolver uma correlação entre  $S_0^\downarrow$  e  $Q_g$  como é tratado para essas variáveis diárias, a única diferença é que para a correlação horária a elevação solar entra como parâmetro (IQBAL, 1983).



**Figura 2.4** Variação da radiação difusa diária ( $k_d$ ) por  $k_t$ .  
Fonte: Iqbal (1983, p.252)

Como apresentado na Figura 3.4, a análise de regressão entre essas razões recai em uma linha de tendência polinomial. Outras inferências podem surgir da análise de regressão linear, como uma tendência logarítmica. Eftimie (2011), por exemplo, propôs 12 equações polinomiais de segundo e terceiro grau ajustadas para cada mês para determinar a radiação difusa diária. Este trabalho foi feito para levar em consideração as condições climatológicas e geográficas específicas (EFTIMIE, 2011). Marques Filho et al. (2016) usaram equações logísticas sigmóides para representar a relação entre  $k_d$  e  $k_t$  horários pois, comparado com outras equações logísticas, a sigmoide melhor representou o comportamento observado principalmente quando  $k_t \rightarrow 1$  (MARQUES et al., 2016). Para alguns autores, como apresentado por Spitters et al. (1986), essa relação é diferente para cada faixa de  $k_t$  (SPITTERS et al., 1986). Outros autores apresentam equações empíricas para descrever essa relação para diferentes lugares como Iqbal (1983), Spitters et al. (1986), Oliveira et al. (2002), Paulescu e Blaga (2016), entre outros.

### 3.1.3 Modelos de balanço de radiação de ondas curtas

O saldo ou balanço de radiação de ondas curtas, ou seja, a diferença entre quanto de radiação solar incide na superfície e quanto é refletida pela mesma, é denominado de balanço de ondas curtas (BOC,  $W/m^2$ ). Existem várias formas de abordar o sistema ambiental a fim de obter o balanço de ondas curtas, modelos de dossel que ligam a biosfera terrestre à atmosfera podem ser categorizados como modelos de multicamadas ou *big-leaf* (DAI et al., 2004).

Modelos como os de *big-leaf* (p. ex. CAMPBELL e NORMAN, 1997; DICKINSON et al., 1981, 1993; IQBAL, 1983; SELLERS et al., 1986, 1996) são mais simples e mapeiam as propriedades de toda a superfície, vegetação + solo, tratando como uma grande folha. No caso do BOC, esses modelos utilizam um albedo que represente a reflexão do conjunto para a radiação solar global conforme as equações apresentadas a seguir (PEREIRA et al., 2007):

$$BOC = Q_g - Q_r \tag{3.21}$$

em que,  $Q_r$  é a densidade de fluxo de radiação solar refletida pela superfície ( $W/m^2$ ) e pode ser representada pelo percentual de radiação incidente que não foi absorvido (PEREIRA et al., 2007).

$$Q_r = \alpha Q_g \quad (3.22)$$

Substituindo a equação 3.22 na equação 3.21, tem-se (PEREIRA et al., 2007):

$$BOC = Q_g - \alpha Q_g = Q_g(1 - \alpha) \quad (3.23)$$

em que,  $\alpha$  é o coeficiente de reflexão para ondas curtas, ou albedo da superfície, que expressa o potencial de reflexão de uma superfície. O albedo é a razão entre a densidade de radiação refletida pela superfície e a densidade de radiação incidente sobre ela, ou seja (PEREIRA et al., 2007):

$$\alpha = \frac{Q_r}{Q_g} \quad (3.24)$$

Sua natureza adimensional permite que o albedo seja expresso como uma porcentagem, e é medido numa escala de zero, para nenhuma reflexão por uma superfície perfeitamente negra, até 1, para uma reflexão perfeita por uma superfície branca.

Porém, o cálculo do albedo do conjunto ainda pode ser mais simples, como apresentado acima ou mais complexo, como albedos horários variáveis e calculados a partir de modelos teóricos ou empíricos. Exemplos de cálculos de albedo mais simples são os albedos médios ou medianos e dos mais complexos, como a proposta por Yang (2006 apud ALFARO, 2017) para grandes planícies do sudoeste americano e ilhas de Manus e Nauru na região tropical do Pacífico, onde o albedo varia em função do ângulo zenital e o descrito por Orsini et al. (2000 apud ALFARO, 2017) para condições extremas em Reeves Neve Glacier, Antártica que varia com a elevação solar (ALFARO, 2017).

Os modelos de multicamadas são mais elaborados e discretizam a superfície em diferentes camadas homogêneas integrando os fluxos de cada uma delas para obter o fluxo total. Uma forma de resolver o balanço de radiação solar para modelos de multicamadas é pela aproximação *two-stream* (COAKLEY e CHÝLEK, 1975). Esta aproximação além de ser realizada para cada camada, aborda separadamente a densidade de radiação direta e difusa, e o espectro do visível e do infravermelho próximo.

Coakley e Chýlek (1975) aplicou a aproximação *two-stream* à equação da transferência radiativa para obter dois modelos de dois fluxos para a transferência de radiação através de uma atmosfera plana e paralela opticamente fina. Os modelos incluem a dependência da reflexão e a transmissão da atmosfera, do ângulo da radiação incidente e da dependência angular da função de fase de espalhamento do meio. Os dois modelos surgem de diferentes métodos para tratar a radiação incidente. De certa forma, os modelos reduzem a aproximação de fina atmosfera até o limite em que a profundidade óptica da atmosfera se aproxima de zero (COAKLEY e CHÝLEK, 1975). Posteriormente, usando a mesma base teórica, Dickinson (1983) aplicou essa relação onde o meio é o dossel da planta.

Dessa forma, o modelo de balanço de radiação solar é resolvido a intervalos regulares, camadas, e cada camada é definida como um estoque, onde é calculada a transferência radiativa separadamente para o espectro do visível e do infravermelho próximo por meio da aproximação *two-stream*. O resultado é um fluxo radiativo difuso ascendente e um descendente que serão os dados de entrada das próximas camadas respectivas. Essa abordagem paralela considera múltiplas reflexões pela camada de vegetação e radiação presa por um dossel denso, porém é ainda suficientemente simples para ser viável a execução sem muita capacidade computacional (COAKLEY e CHÝLEK, 1975).

Este modelo apresenta equações dependentes das variáveis relativas a distribuição, orientação e biometria das folhas e galhos e suas projeções; as propriedades óticas inerentes aos constituintes das camadas; ao ângulo de incidência da radiação solar e sua intensidade; aos coeficientes de espalhamento e parâmetros de retro espalhamento do meio, entre outros (POLLARD e THOMPSON, 1995). Estas variáveis foram descritas por alguns autores (BONAN, 1996; DICKINSON, 1983; YANAGI e COSTA, 2011).

No caso específico de camadas do dossel estruturalmente homogêneas, o espalhamento elementar da folha é modelado como planos orientados de tamanho pequeno finito. Dependendo do tipo de vegetação e de condições ambientais, a probabilidade de orientação da normal dos planos pode ser diferente. De Wit (1965 apud ROSS, 1981) sugere quatro classes de orientação de acordo com a inclinação da normal a folha: orientação planófila ou erectófila, o arranjo foliar é predominantemente horizontal ou vertical, respectivamente; Orientação plagiófila, arranjo foliar com predominância de inclinação de 45°; e orientação extremófila, curva de pico duplo de distribuição de

ângulos de inclinação com máximo entre 0° e 90°. Entretanto, a última classificação não ocorre na natureza (ROSS, 1981).

Uma vez que a função da probabilidade de distribuição das folhas é conhecida, é possível expressar a projeção em determinada direção de qualquer volume elementar, logo, a área total projetada por uma camada homogênea de vegetação ( $G(\mu)$ ). Essa projeção, que descreve a área foliar mais troncos e galhos de uma camada homogênea relativa projetada na direção  $\mu$ , foi apresentada por diferentes autores entre eles Yanagi e Costa (2011), Goudriaan (1977) e Bonan (1996).

A projeção,  $G(\mu)$ , que descreve a área foliar mais troncos e galhos de uma camada homogênea relativa projetada na direção  $\mu$ , é expressa por Yanagi e Costa (2011) genericamente por:

$$G(\mu) = \frac{1}{2} + \left( \frac{4\sqrt{1-\mu^2} - \pi}{2\pi} \right) \chi^v + \left( \frac{2\mu - 1}{2} \right) \chi^h \quad (3.25)$$

Esta projeção tem dependência do índice de inclinação de área foliar ( $\chi$ ), ou seja, a orientação foliar, também definida como partição de ângulo da folha a partir de uma distribuição aleatória.  $\chi$  é igual a +1 quando todas as folhas forem horizontais, 0 para completamente aleatórias, e -1 para todas as folhas verticais (BONAN, 1996; ROSS, 1981). Dessa forma, o sinal de '+' ou de '-' indica um desvio da distribuição de inclinação de completamente aleatória na direção horizontal ou vertical, respectivamente (ROSS, 1981).  $\chi^h$  e  $\chi^v$  expressa por Yanagi e Costa (2011) é a aplicação positiva ou negativa de  $\chi$ , respectivamente (YANAGI e COSTA, 2011).

Goudriaan (1977) e Bonan (1996) apresenta o cálculo de  $G(\mu)$  como:

$$G(\mu) = \varsigma_1 + \varsigma_2\mu \quad (3.26)$$

em que,  $\varsigma_1 = 0,5 - 0,633\chi - 0,33\chi^2$  e  $\varsigma_2 = 0,877(1 - 2\varsigma_1)$  para  $-0,4 < \chi < 0,6$  (BONAN, 1996).

Cuadra (2010) encontrou para o seu experimento com a cultura de cana-de-açúcar no norte de São Paulo, valor de  $\chi$  igual a -0,2 que melhor descrevia os dados observados. Espécies de plantas C4 tem valores típicos de  $\chi$  igual a -0,5 (CUADRA, 2010). Yanagi e Costa (2011) utilizaram o valor de 0,1 para o dossel inferior (espécies C4 como gramíneas) em sua pesquisa para a floresta amazônica (YANAGI e COSTA, 2011).

Bonan (1996) apresenta os valores para a partição de ângulo da folha a partir de uma distribuição aleatória para diferentes tipos de vegetação conforme apresentado na Tabela 3.1.

**Tabela 3.1** Valores de  $\chi$  apresentados por Bonan (1996)

Vegetação	$\chi$
Árvore conífera de folhas sempre verdes	0,01
Árvore conífera caducifólias	0,01
Árvore não-conífera de folhas sempre verdes	0,10
Árvore não-conífera caducifólias	0,25
Árvore sazonal tropical	0,01
Gramíneas C3	-0,30
Árvore arbustiva de folhas sempre verdes	0,01
Árvore arbustiva caducifólia	0,25
Árvore arbustiva caducifólia ártica	0,25
Gramínea ártica	-0,30
Cultura Agrícola	-0,30
Gramínea C4	-0,30

Fonte: Bonan (1996)

Os parâmetros óticos utilizados neste modelo são o  $\omega\beta$  e o  $\omega\beta_0$  que representam a integral sobre a distribuição apropriada da probabilidade da orientação das folhas entre 0 e  $\pi/2$  do parâmetro de espalhamento de um elemento para radiação difusa e direta, respectivamente. Ademais, estas variáveis são dependentes do comprimento de onda (DICKINSON, 1983; YANAGI e COSTA, 2011).  $\beta$  e  $\beta_0$  são os parâmetros de retroespalhamento de folha/tronco e galho para radiação difusa e direta, respectivamente (POLLARD e THOMPSON, 1995). Alguns autores apresentam as resoluções para essas variáveis como Yanagi e Costa (2011), Bonan (1996) e Dickinson (1983).

Resolvendo a integral para cada banda de comprimento de onda, Yanagi e Costa (2011) apresentam as equações genericamente como (DICKINSON, 1983; YANAGI e COSTA, 2011):

$$\omega_{\Lambda}\beta_{\Lambda} = \chi^v \left( \frac{\rho_{\Lambda} + \tau_{\Lambda}}{6} \right) + \chi^h \left( \frac{\rho_{\Lambda} - \tau_{\Lambda}}{3} \right) + \left( \frac{2\rho_{\Lambda} + \tau_{\Lambda}}{3} \right) \quad (3.27a)$$

$$\omega_{\Lambda}\beta_{0\Lambda} = \chi^v \frac{2\tau(\mu) - 1}{2} (\rho_{\Lambda} - \tau_{\Lambda}) + \chi^h \tau(\mu) (\rho_{\Lambda} - \tau_{\Lambda}) + \rho_{\Lambda} (1 - \tau(\mu)) + \tau_{\Lambda} \tau(\mu) \quad (3.27b)$$

em que,  $\tau(\mu)$  é o coeficiente de transmitância para a radiação direta (YANAGI e COSTA, 2011).

Bonan (1996) e Dickinson (1983) apresentam as mesmas equações da seguinte forma:

$$\omega_{\Lambda}\beta_{\Lambda} = \frac{1}{2} \left[ \rho_{\Lambda} + \tau_{\Lambda} + (\rho_{\Lambda} - \tau_{\Lambda}) \left( \frac{1 + \chi}{2} \right)^2 \right] \quad (3.28a)$$

$$\omega_{\Lambda}\beta_{0\Lambda} = \frac{1 + \bar{\mu} \frac{G(\mu)}{\mu}}{\bar{\mu} \frac{G(\mu)}{\mu}} \alpha_s(\mu)_{\Lambda} \quad (3.28b)$$

em que,  $\alpha_s(\mu)_{\Lambda}$  é o albedo de espalhamento na direção de  $\mu$  definido por Bonan (1996) como:

$$\alpha_s(\mu)_{\Lambda} = \frac{\omega_{\Lambda}}{2} \frac{G(\mu)}{\mu\zeta_2 + G(\mu)} \left[ 1 - \frac{\mu\zeta_1}{\mu\zeta_2 + G(\mu)} \ln \left( \frac{\mu\zeta_1 + \mu\zeta_2 + G(\mu)}{\mu\zeta_1} \right) \right] \quad (3.29)$$

A profundidade ótica difusa inversa média por unidade de folha e caule é dada por (BONAN, 1996):

$$\bar{\mu} = \int_0^1 \frac{\mu'}{G(\mu')} d\mu' \quad (3.31)$$

em que,  $\mu'$  é definido por Dickinson (1983) como sendo o cosseno do ângulo de reflexão (rad) da radiação solar (BONAN, 1996; DICKINSON, 1983). Segundo Yanagi e Costa (2011),  $\bar{\mu}$  varia entre 0,90 e 1,04 para casos entre todas as folhas com orientação vertical e todas as folhas com orientação horizontal e 1 para casos esféricos.

Como apresentado anteriormente,  $\omega$  é definido como o coeficiente de espalhamento de folha/tronco e galho, ou seja, é a soma dos coeficientes ponderados de reflectância ( $\rho_{\Lambda}$ ) e transmitância ( $\tau_{\Lambda}$ ). Estes são definidos por (BONAN, 1996; DICKINSON et al., 1981; YANAGI e COSTA, 2011):

$$\rho_{\Lambda} = \rho_{\Lambda}^{leaf} w_{leaf} + \rho_{\Lambda}^{stem} w_{stem} \quad (3.30a)$$

$$\tau_{\Lambda} = \tau_{\Lambda}^{leaf} w_{leaf} + \tau_{\Lambda}^{stem} w_{stem} \quad (3.30b)$$

em que,  $w_{leaf} = IAF/(IAF+IAG)$  e  $w_{stem} = IAG/(IAF+IAG)$ . IAF ( $m^2/m^2$ ) e IAG ( $m^2/m^2$ ) são os índices de área foliar e de tronco/galho, respectivamente, que expressam a relação entre a área de cada folha ou tronco/galho e a área de superfície do solo disponível para a cultura.

O modelo LSX original utiliza os dados para  $\rho_{\Lambda}^{leaf}$ ,  $\rho_{\Lambda}^{stem}$ ,  $\tau_{\Lambda}^{leaf}$  e  $\tau_{\Lambda}^{stem}$  apresentados por Dorman e Sellers (1989, Tabela 2) (POLLARD e THOMPSON, 1995). Porém, esses valores são dados para 13 biomas gerais encontrados no mundo e não considera amplas possibilidades de uso e ocupação do solo. Para a região em que se deu a coleta de dados, o bioma apresentado no artigo é de arbustos de folha larga com cobertura do solo (*Larrea tridentata*, *Agropyron dasystachyum*) (DORMAN AND SELLERS, 1989). Esses são os mesmos dados apresentados por Bonan (1996) e podem ser aplicados para plantações, gramíneas C3 e C4, e gramíneas árticas. Llopart (2009) calibrou o modelo SiB em módulos sequenciais para a floresta tropical amazônica e apresentou valores para esses coeficientes coerentes com a região de estudo. O modelo utilizado pela autora separava os coeficientes nos dois espectros de estudo e entre a folha e o galho. Yanagi e Costa (2011), também desenvolveram sua pesquisa para a floresta amazônica, porém os valores encontrados não foram estudados separadamente para folhas e para galhos. O resumo dos valores encontrados nessas literaturas com as especificações demandadas pelo modelo é apresentado na Tabela 3.2.

**Tabela 3.2** Valores dos coeficientes de transmitância e refletância

Parâmetros	<i>Dorman and Sellers</i> (1989, Tabela 2)	<i>Llopart</i> (2009)	<i>Yanagi e Costa</i> (2011)*
$\rho_{VIS}^{leaf}$	0,11	0,10	0,062
$\tau_{VIS}^{leaf}$	0,07	0,05	0,07
$\rho_{IV}^{leaf}$	0,58	0,45	0,60
$\tau_{IV}^{leaf}$	0,25	0,25	0,25
$\rho_{VIS}^{stem}$	0,36	0,16	-
$\tau_{VIS}^{stem}$	0,22	0,001	-
$\rho_{IV}^{stem}$	0,58	0,39	-
$\tau_{IV}^{stem}$	0,38	0,001	-

\*Os valores apresentados por *Yanagi e Costa (2011)* são referentes apenas aos coeficientes e ao espectro

Dickinson (1983) se baseou em Ross (1975 apud DICKINSON, 1983) e Goudriaan (1997 apud DICKINSON, 1983) para tratar os coeficientes de transmitância e refletância como percentuais do coeficiente de espalhamento e os apresenta para o visível e para o infravermelho próximo, como apresentado na Tabela 3.3 (DICKINSON, 1983).

**Tabela 3.3** Coeficientes de espalhamento típicos para folhas

	Visível	Infravermelho próximo
$\omega_{\Lambda}$	0,15 – 0,20	0,80 – 0,85
$\rho_{\Lambda}$	0,6 $\omega_{\Lambda}$	0,7 $\omega_{\Lambda}$
$\tau_{\Lambda}$	0,4 $\omega_{\Lambda}$	0,3 $\omega_{\Lambda}$

Fonte: Dickinson (1983)

O modelo de aproximação *Two-Stream* para dossel vegetal na forma de resolução analítica foi dado principalmente por Pollard e Thompson (1995) a partir de albedos da superfície do solo conhecidos e fluxos de radiação direto e difuso incidentes no topo do dossel.

Cuadra et al. (2012) simularam o albedo total para o solo nu de cana-de-açúcar nos intervalos entre as plantações e obtiveram valores em torno de 0,15. Porém, não houve um estudo para a banda do visível e do infravermelho próximo separadamente. Llopart (2009) e Yanagi e Costa (2011) adotaram em seus estudos um albedo total do solo para o espectro do visível e outro para espectro do infravermelho próximo como apresentado na Tabela 3.4.

**Tabela 3.4** Valores de albedo do solo

Parâmetros	Llopart (2009)	Yanagi e Costa (2011)
$\alpha_{g,VIS}$	0,11	0,10
$\alpha_{g,NIR}$	0,225	0,40

Segundo Dickinson (1983), o processo para determinar quantitativamente o albedo da superfície da terra é complexo. Porém, o documento apresenta na sua Tabela III os valores adotados por Dickinson et al. (1981) como base provisória para a atribuição de albedos em um modelo climático sobre superfícies sem neve. Esses valores são apresentados a seguir na Tabela 3.5 (DICKINSON et al., 1981).

**Tabela 3.5** Albedo da vegetação e do solo

Tipos de superfície		Albedos <sup>1</sup>	
		Visível ( $\lambda < 700$ nm)	Infravermelho próximo ( $\lambda > 700$ nm)
Solo nu não-desértico	Seco	0,13	0,26
	Úmido	0,05	0,10
Solo desértico ou areia	Seco	0,26	0,52
	Úmido	0,10	0,20
Vegetação rasteira (culturas ou gramíneas)		0,10	0,30
Floresta conífera		0,04	0,20
Floresta decídua de latitude média		0,08	0,28
Floresta Tropical		0,04	0,20
Tundra		0,15	0,40

<sup>1</sup> Para áreas parcialmente vegetadas, é calculada a média entre albedos do solo nu e de superfície vegetada.  
Fonte: Dickinson et al. (1981)

Bonan (1996) trabalhou com albedos de solo para cada uma das classes de cor apresentadas por Dickinson et al. (1993) e seu nível de saturação de água. A equação utilizada para essa ponderação é apresentada como:

$$\alpha_{g\Lambda}^{\mu} = \alpha_{g\Lambda}^d = \alpha_{sat\Lambda} + \Delta \leq \alpha_{dry\Lambda} \quad (3.32)$$

em que  $\alpha_{g\Lambda}^{\mu}$  e  $\alpha_{g\Lambda}^d$  são os albedos do solo para cada banda para radiação direta e difusa, respectivamente,  $\Delta$  depende do volume de água da primeira camada de solo ( $V_1$ ) de forma que  $\Delta = 0,11 - 0,40 V_1 > 0$  e,  $\alpha_{sat\Lambda}$  e  $\alpha_{dry\Lambda}$  são albedos para solos saturados e secos para cada classe de cores conforme apresentado na Tabela 3.6. Essa classificação do solo por tonalidades de sua cor é apresentada por Dickinson et al. (1993) ao desenvolver o *Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme* (BATS).

**Tabela 3.6** Albedo por classe de cor do solo

Classes de Cor	Seco		Saturado	
	Visível	Infravermelho Próximo	Visível	Infravermelho Próximo
1 = Claro	0,24	0,48	0,12	0,24
2	0,22	0,44	0,11	0,22
3	0,20	0,40	0,10	0,20
4	0,18	0,36	0,09	0,18
5	0,16	0,32	0,08	0,16
6	0,14	0,28	0,07	0,14
7	0,12	0,24	0,06	0,12
8 = Escuro	0,10	0,20	0,05	0,10

Fonte: Dickinson et al. (1993)

### 3.2 Métodos Numéricos

Os métodos numéricos são técnicas de formulação de problemas matemáticos para que esses possam ser resolvidos por operações aritméticas (CHAPRA e CANALE, 2011). Essas técnicas servem para solucionar problemas como sistemas lineares e não-lineares, inversão de matrizes, sistemas de equações diferenciais ordinárias (EDO) e equações diferenciais parciais (EDP), entre outros (ISAACSON e KELLER, 1966).

Equações diferenciais são fundamentais, pois diversas leis e relações físicas aparecem matematicamente descritas nesta forma. As EDOs são assim classificadas por envolver derivadas de uma função de uma só variável independente, a própria função e a variável independente. Ademais, estas podem conter diversas ordens que caracterizam pela quantidade de vezes que esta função está derivada (KREYZIG, 2006).

Uma solução geral para essa EDO ocorre para casos em que se procura a solução para  $y = y(x)$  em um intervalo pré-determinado de  $a \leq x \leq b$ , ou seja, isso incluirá uma constante arbitrária para a solução geral (KREYZIG, 2006). Para resolver uma EDO utilizando-se Métodos Numéricos é necessário o modelo estar bem definido, isto é, ser um problema bem-posto. Este termo foi introduzido por Jacques Hadamard. Modelos matemáticos de fenômenos físicos bem-postos devem ter as seguintes propriedades: Existência da solução; Unicidade da solução, ou seja, condições de contorno e iniciais insuficientes levam a soluções múltiplas e quando estão em excesso levam a solu-

ções não físicas; Solução depende continuamente das condições iniciais e de contorno, isto é, implica que pequenas mudanças nas condições iniciais e de contorno causam pequenas mudanças na solução (HADAMARD, 1902). Ao discretizar uma EDO por meio de algum Método Numérico, utiliza-se uma subdivisão do intervalo apresentado por um número finito de pontos distintos denominado malha computacional uniforme (ISAACSON e KELLER, 1966; KIUSALAAS, 2005).

Desta forma, procura-se uma solução da equação discretizada em cada ponto da malha que é uma forma de aproximação à solução exata no ponto correspondente. Os Métodos Numéricos são utilizados para que essas quantidades sejam determinadas a partir de um conjunto de equações que, de certo modo, aproximam a EDO. Essas equações aproximadas são chamadas de equações de diferenças (ISAACSON e KELLER, 1966).

Existem várias maneiras sistemáticas nas quais pode-se “derivar” ou gerar equações de diferenças. Ou seja, essas equações de diferenças ou modelos discretos são alcançados por técnicas numéricas como forma de obter o resultado do problema contínuo. Entretanto, a eficácia dos modelos discretos só pode ser determinada ao atender três condições: tenha solução única; a solução, pelo menos para um intervalo "suficientemente pequeno", deve ser "próxima" da solução exata, ou seja, espera-se que esta seja a solução da EDO, mas isto depende intrinsecamente das condições de contorno, condições iniciais e também da malha computacional; a solução deve ser "efetivamente computável". Resumindo, deve ser estável e convergente (ISAACSON e KELLER, 1966).

A série de Taylor é uma formulação matemática que é amplamente usada para expressar uma função de forma aproximada em que a grande vantagem na sua aplicação é a obtenção das propriedades dos erros dessa aproximação. Em suma, a série de Taylor visa prever o valor da função em determinado ponto em termos do valor da função e suas derivadas em um outro ponto. Com isso, o teorema de Taylor afirma que qualquer função suave pode ser aproximada por um polinômio (CHAPRA e CANALE, 2011).

Neste caso, a aplicação da série de Taylor na solução numérica se faz necessária, pois é possível determinar o erro que se está assumindo nas aproximações das derivadas. A forma da série de Taylor utilizada para melhor representar a função que ao ser derivada obtém-se a EDO apresentada depende da tendência demonstrada, seja ela, por exemplo, linear, logarítmica, logística, polinomial, entre outras (CHAPRA e CANALE, 2011).

As EDOs representam problemas das mais diversas áreas de conhecimento. Uma classe de problemas envolvendo EDOs é conhecida como Problema de Valor Inicial (PVI), em que é necessário passar para o problema um valor inicial, isto é, o valor da função incógnita num determinado ponto por onde a solução passa. Outra classe de problemas é conhecida como Problema de Valor de Contorno (PVC), que necessita de informações de parâmetros e das condições de contorno. Ademais, a resolução do método pode ser do tipo implícita ou explícita, em que a primeira trata de determinar o valor da função incógnita de forma simultânea para todos os pontos do domínio, e o segundo, trata de determinar o valor da função incógnita num determinado ponto utilizando-se os valores da função determinados nos pontos anteriores (CHAPRA e CANALE, 2011; KIUSALAAS, 2005).

Problemas de Valor de Contorno para uma EDO são aqueles no qual são passadas informações sobre a função incógnita na fronteira (contorno) do domínio. As condições de contorno são do tipo Dirichlet, Neumann e Robin. O primeiro caso acontece quando o valor da função é prescrito na fronteira, o segundo quando a informação passada é a sua taxa de variação e, por último, a condição do tipo Robin é uma combinação das duas primeiras (CHAPRA e CANALE, 2011; KIUSALAAS, 2005).

Apresenta-se então dois tipos diferentes de métodos numéricos para aproximar as soluções de Problemas de Valor de Contorno (ISAACSON e KELLER, 1966): Método de Valor Inicial ou *Shooting Method* e Método das Diferenças Finitas.

O primeiro método apresentado trata de superar a falta de condições iniciais por meio uma abordagem de tentativa e erro, ou seja, na conversão de um Problema de Valor de Contorno em um Problema de Valor Inicial equivalente (CHAPRA e CANALE, 2011). É muito improvável que a solução resultante satisfaça as condições de contorno na outra extremidade, mas, ao analisar a discrepância, pode-se estimar quais mudanças são necessárias nas condições iniciais antes de integrá-las novamente (KIUSALAAS, 2005).

Este método visa executar numericamente a abordagem formal a solução exata do Problema de Valor de Contorno obtida considerando o Problema de Valor Inicial relacionado. Ou seja, a grosso modo, o dado inicial é ajustado para que a solução para um Problema de Valor Inicial satisfaça as condições de contorno requeridas em um ponto “final” (limite) (ISAACSON e KELLER, 1966; KIUSALAAS, 2005).

Os efeitos do erro de arredondamento neste método podem ser significativos. Quando realizando os cálculos, o significado é frequentemente perdido quando quantidades, quase iguais, são subtraídas umas das outras. Assim, para intervalos suficientemente pequenos, o erro se comporta como teoricamente esperado. Na prática, no entanto, muitas vezes pode ser necessário usar muitos números significativos nos cálculos para realizar essas estimativas de erro (ISAACSON e KELLER, 1966).

Este método serve para Problemas de Valor de Contorno linear mais gerais. No caso de PVCs não-lineares, a interpolação ou extrapolação linear por dois pontos das soluções não resultará necessariamente em estimativa acurada da condição de contorno exigida para alcançar uma solução exata. Uma abordagem para contornar essa questão é fazer três aplicações do *Shooting Method* e usar um polinômio interpolador quadrático para obter uma estimativa da condição de contorno adequada. Ainda assim continua não sendo provável que tal abordagem forneça a resposta exata e com mais esforço computacional com iterações adicionais resolve-se Problemas de Valor de Contorno não-linear (CHAPRA e CANALE, 2011).

Dessa forma, este método se torna muito trabalhoso e exige capacidade computacional elevada para equações de ordem superior devido a necessidade de supor duas ou mais condições. O *Shooting Method* tem essa desvantagem em relação ao Método das Diferenças Finitas (CHAPRA e CANALE, 2011).

O Método das Diferenças Finitas não é baseado em métodos chamados de direto como o *Shooting Method*. Neste caso, as equações diferenciais são aproximadas por diferenças finitas em pontos de malha uniformemente espaçados. Como consequência, uma equação diferencial é transformada em um conjunto de equações algébricas simultâneas (KIUSALAAS, 2005). Entretanto, é necessário, após a formulação, a aplicação de um método direto para a resolução de suas equações algébricas.

Os métodos de diferença também podem ser aplicados a Problemas de Valor de Contorno de segunda ordem não-lineares razoavelmente gerais aplicando iterações para resolver as equações. Entretanto, as iterações não são empregadas para satisfazer as condições de contorno corretas, como seria o caso nos métodos de valores iniciais (ISAACSON e KELLER, 1966).

Diversos autores propuseram formulações matemáticas na aplicação do Método das Diferenças Finitas e apresentaram diferentes esquemas de resolução como, por exemplo, o método de Euler, método de Runge-Kutta, método de Lax-Friedrichs, entre outros. Cada esquema tem sua

forma de resolver quanto, por exemplo, aproximações para as derivadas serem avançadas, centrais ou atrasadas e a ordem do erro assumido (FERREIRA, 2003).

A exemplo, o método de Euler apresenta erro assumido de primeira ordem enquanto o método de Runge-Kutta, um erro de quarta ordem. Ou seja, o método de Euler por si só, para alcançar a mesma ordem de erro do método de Runge-Kutta necessitará de muitos passos de cálculo a mais. Entretanto, quando o método de Euler é bem-posto para o problema, este necessita de uma capacidade computacional menor que o outro método.

Em uma comparação entre a solução analítica e as soluções numéricas obtidas geralmente há alguma discrepância entre as abordagens. Para ambos os métodos numéricos, esses erros podem ser atenuados diminuindo-se seus respectivos tamanhos de passo e podem chegar a uma equivalência de resultados (CHAPRA e CANALE, 2011).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Área de Estudo

Medidas micrometeorológicas e biométricas foram conduzidas na área experimental do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas (CECA/UFAL) em Rio Largo, Alagoas, Nordeste do Brasil (09° 28' 02" S; 35° 49' 43" W; 127 m) em cultivo de cana-de-açúcar. O cultivo da cana, variedade RB 92579, foi em regime de sequeiro (SANTOS et al., 2017).

O clima da região é classificado como megatérmico, tropical úmido. O período chuvoso ocorre de março a agosto, quando se concentra 78 % da precipitação total anual, que tem média de 1.818 mm. A temperatura do ar média varia de 19,3°C, aproximadamente em agosto, a 31,7°C, por volta de janeiro, com média anual de 25,4°C (SANTOS et al., 2017).

O solo no local foi classificado como latossolo amarelo argisólico coeso de textura de argila média. As outras características físico-hídricas do solo, como o conteúdo de água na capacidade de campo ( $\theta_{cc} = 0,207 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ), conteúdo de água no ponto de murcha permanente ( $\theta_{pmp} = 0,124 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ), densidade do solo ( $1,50 \text{ kg m}^{-3}$ ), porosidade total do solo (42,3 %) e velocidade básica de infiltração ( $52 \text{ mm h}^{-1}$ ) foram determinadas no laboratório de solo, água e energia do Centro de Ciências Agrárias (SANTOS, 2010).

O balanço de radiação e os perfis das propriedades atmosféricas foram medidas em uma torre micrometeorológica de 6 m de altura, instalada numa parcela experimental de 1 ha. A parcela foi constituída de 11 linhas de 21 m de comprimento, com espaçamento de um metro entre linhas, o plantio foi realizado com 15 gemas por metro linear. A área experimental foi cercada por culturas comerciais de cana-de-açúcar. O delineamento experimental foi em blocos casualizados, com quatro repetições (SANTOS, 2010).

## **4.2 Medidas Radiométricas**

### **4.2.1 Balanço de radiação de ondas curtas**

As medições dos componentes do saldo de radiação em ondas curtas (incidente e refletida) e ondas longas (emitida pela atmosfera e superfície) foram obtidas por um saldo radiômetro (CNR1, Kipp e Zonen, Holanda), disposto a 0,5 m acima do dossel da cultura. Os sensores foram conectados a um sistema automático de aquisição de dados (CR10X, Campbell Scientific Inc., EUA), que realizava medições a cada 10 s e, posteriormente, armazenava os fluxos médios a cada 10 min. Esses dados foram coletados no período de 17 a 24 de fevereiro de 2006 (SANTOS et al., 2017).

### **4.2.2 Medidas radiação difusa e global**

Os dados utilizados para ajuste dos modelos empíricos de radiação solar global, direta e difusa foram obtidos por dois piranômetros (CM5, Kipp & Zonen, The Netherlands) no período de janeiro de 1997 a dezembro de 1999, também na Universidade Federal de Alagoas (9° 40' S; 35° 42' W; 127 m), os quais mediam a radiação solar global e sua componente difusa ( $S_0^d$ ). Nicácio (2002) apresentou as médias mensais dos anos medidos para cada horário para o período de observação.

Ao piranômetro usado para medir a radiação solar difusa foi acoplado um anel de sombreamento com inclinação, em relação ao zênite local, igual a latitude de Maceió–AL para impedir a incidência da radiação solar direta. Entretanto, foi necessário realizar uma correção em função do raio e largura do anel de sombreamento, latitude local, declinação solar e ângulo zenital do Sol na radiação solar difusa, uma vez que o anel de sombreamento impede a chegada de parte desta componente (NICÁCIO, 2002).

## **4.3 Medidas Biométricas**

As medições do número de folhas expandidas (NFE), assim como as medidas de comprimento da folha (L) e largura (W) foram feitas mensalmente durante todo o ciclo de crescimento da

cultura. O início das avaliações biométricas foi 60 dias após o plantio (DAP, 15/11/05) e a última ocorreu nos 411 DAP (1/11/2006). A área de cada folha (AF) da planta foi determinada pela relação:  $(0,75 \times L \times W) \times (NFE + 2)$  e, utilizada para calcular o índice de área foliar (IAF), relação entre AF total por planta e a área de superfície do solo disponível para a mesma ( $0,067 \text{ m}^2 \text{ planta}^{-1}$ ) (SANTOS, 2010).

As estimativas do índice de área foliar foram ajustadas ao modelo polinomial de segundo grau, em função dos dias após o plantio. A partir do ajuste, a duração dos estágios de crescimento da cultura da cana-de-açúcar foi determinada usando o IAF e a duração do crescimento dos estágios de cultivo - inicial (60 dias), crescimento (124 dias), intermediário (196 dias) e final de temporada (60 dias) - para as condições climáticas locais (SANTOS, 2010).

#### 4.4 Modelo de Transferência Radiativa

##### 4.4.1 Radiação incidente: frações direta e difusa

O modelo de transferência radiativa trabalhado exige a separação das componentes direta e difusa da radiação incidente à superfície. Como a radiação global foi medida por meio do saldo radiômetro, foi necessária a separação das componentes com auxílio de modelos.

Dois métodos empíricos de equações baseadas na análise de dispersão dos dados observados da relação entre  $k_d$  e  $k_t$  foram testados: uma equação logística e uma equação polinomial de 3º grau. Essas equações genéricas são apresentadas a seguir, respectivamente:

$$k_d = a + b \frac{1}{1 + \left| \frac{k_t}{c} \right|^d} \quad (4.1)$$

$$k_d = a k_t^3 + b k_t^2 + c k_t + d \quad (4.2)$$

em que,  $a$ ,  $b$ ,  $c$  e  $d$  são parâmetros empíricos.

Os coeficientes dos modelos foram ajustados para otimização da estimativa de  $S_0^\downarrow$ . Para esse ajuste foi utilizado o método dos mínimos quadrados, com auxílio do software SigmaPlot®. Foram

considerados os primeiros seis meses de medidas para o ajuste dos coeficientes e os demais meses ficaram disponíveis para testar as estimativas. Por meio da diferença entre  $Q_g$  e  $S_0^\downarrow$ , estimou-se a parcela de radiação solar direta.

Os modelos apresentados calculam  $Q_0$ , assim como as variáveis  $\varphi$  e  $dr$  por meio das equações 2.18, 2.10 e 2.17, respectivamente, que dependem do ângulo de incidência da radiação solar ao longo do dia para a escala deste trabalho, ou seja, com o ângulo zenital (eq. 2.10) e o dia de ordem do ano ou dia juliano. O ângulo de incidência da radiação solar na escala sub-diária varia com a hora do dia, declinação solar e com a latitude ( $-9,47^\circ$ ) da área de estudo. É importante ressaltar que a latitude normalmente é expressa em graus, porém para as equações apresentadas neste trabalho deve-se utilizá-la em radiano.

#### 4.4.2 Transferência radiativa pelo dossel

O modelo usado nesse trabalho é fundado no método de aproximação *two-stream* aplicado à equação da transferência radiativa para obter dois modelos de dois fluxos para a transferência de radiação em dosséis de vegetação. Todos os cálculos são resolvidos separadamente para dois comprimentos de onda: visível (400 a 700 nm) e infravermelho próximo (700 a 4000 nm).

Dentro de cada camada, os fluxos de radiação difuso ascendentes e descendentes, respectivamente, são descritos a seguir (BONAN, 1996; DICKINSON et al., 1981; POLLARD e THOMPSON, 1995; YANAGI e COSTA, 2011):

$$-\bar{\mu} \frac{dS^\uparrow}{dL} + (1 - (1 - \beta)\omega)S^\uparrow - \omega\beta S^\downarrow = \omega\beta_0\bar{\mu} \frac{G}{\mu} D_0 e^{-GL/\mu} \quad (4.3a)$$

$$\bar{\mu} \frac{dS^\downarrow}{dL} + (1 - (1 - \beta)\omega)S^\downarrow - \omega\beta S^\uparrow = \omega(1 - \beta_0)\bar{\mu} \frac{G}{\mu} D_0 e^{-GL/\mu} \quad (4.3b)$$

em que,  $S^\uparrow$  e  $S^\downarrow$  são os fluxos radiativos difuso ascendentes e descendentes ( $W/m^2$ ), respectivamente,  $L$  é o índice de área foliar e de troncos e galhos cumulativo de um lado apenas e que aumenta no sentido descendente ( $m^2/m^2$ ),  $\bar{\mu}$  é a profundidade ótica difusa inversa média por unidade de  $dL$  ( $m^2/m^2$ ),  $\mu$  é o cosseno da radiação solar direta incidente (cosseno do ângulo zenital) e  $D_0$  sua intensidade ( $W/m^2$ ),  $G(\mu)$  é a área foliar relativa de troncos e galhos projetada na direção  $\mu$  ( $m^2/m^2$ ),

$\omega$  é o coeficiente de espalhamento de folha/tronco e galho, e  $\beta$  e  $\beta_0$  são os parâmetros de retroespalhamento de folha/tronco e galho para radiação difusa e direta, respectivamente (POLLARD e THOMPSON, 1995). A intensidade da radiação solar direta dentro da camada é dada por  $D_0 e^{-GL/\mu}$ .

A projeção,  $G(\mu)$ , expressa por Yanagi e Costa (2011) genericamente, é utilizada no modelo na forma:

$$G(\mu) = \frac{1}{2} + \left( \frac{4\sqrt{1-\mu^2} - \pi}{2\pi} \right) \chi \quad (4.4)$$

Os parâmetros  $\beta$  e  $\beta_0$  são calculados a partir das equações apresentadas por Yanagi e Costa (2011) (DICKINSON, 1983; YANAGI e COSTA, 2011):

$$\beta_\Lambda = \frac{\chi \left( \frac{\rho_\Lambda + \tau_\Lambda}{6} \right) + \left( \frac{2\rho_\Lambda + \tau_\Lambda}{3} \right)}{\omega_\Lambda} \quad (4.5a)$$

$$\beta_{0\Lambda} = \frac{\chi \frac{2c(\mu) - 1}{2} (\rho_\Lambda - \tau_\Lambda) + \rho_\Lambda (1 - c(\mu)) + \tau_\Lambda c(\mu)}{\omega_\Lambda} \quad (4.5b)$$

em que,  $c(\mu)$  é o coeficiente de transmitância, que varia entre 0,5 para  $\mu = 0$  e 0,1667 para  $\mu = 1$  (YANAGI e COSTA, 2011). As duas bandas ( $\Lambda$ ) tratadas por esse modelo de forma separadamente pela relevância de ambas na composição da radiação solar são o espectro do visível (vis) e do infravermelho (iv).

O parâmetro  $\omega$  é calculado como:

$$\omega_\Lambda = \rho_\Lambda + \tau_\Lambda \quad (4.6)$$

A profundidade ótica difusa inversa média é calculada para o modelo como:

$$\bar{\mu} = \frac{1}{\zeta_2} \left[ 1 - \frac{\zeta_1}{\zeta_2} \ln \left( \frac{\zeta_1 + \zeta_2}{\zeta_1} \right) \right] \quad (4.7)$$

As medidas dos valores de IAF e IAG para a cultura cujos dados foram usados para ajustar e testar esse modelo foram obtidas por Santos et al. (2017), sendo de IAF = 2,5 e IAG = 1,4 para o período de medidas do saldo radiômetro.

Devido à falta de dados de cana-de-açúcar para os coeficientes  $\rho_{\Lambda}^{leaf}$ ,  $\rho_{\Lambda}^{stem}$ ,  $\tau_{\Lambda}^{leaf}$  e  $\tau_{\Lambda}^{stem}$ , os valores inicialmente utilizados no programa foram os descritos por Yanagi e Costa (2011). Entretanto, esses coeficientes serão ajustados por modelagem inversa.

#### 4.4.3 Condições de contorno

As condições de contorno necessárias para a resolução dessas equações são apresentadas no modelo como:

1. Para o topo do dossel, em que  $L = 0$ , o valor de  $S^{\downarrow} = S_0^{\downarrow}$ , obtido por meio do melhor modelo de cálculo de radiação difusa incidente descrito anteriormente.
2. Para a radiação ascendente, que incide embaixo do dossel, em que  $L = L_b = IAF + IAG$ , o valor de  $S^{\uparrow}$  é dado pela equação:

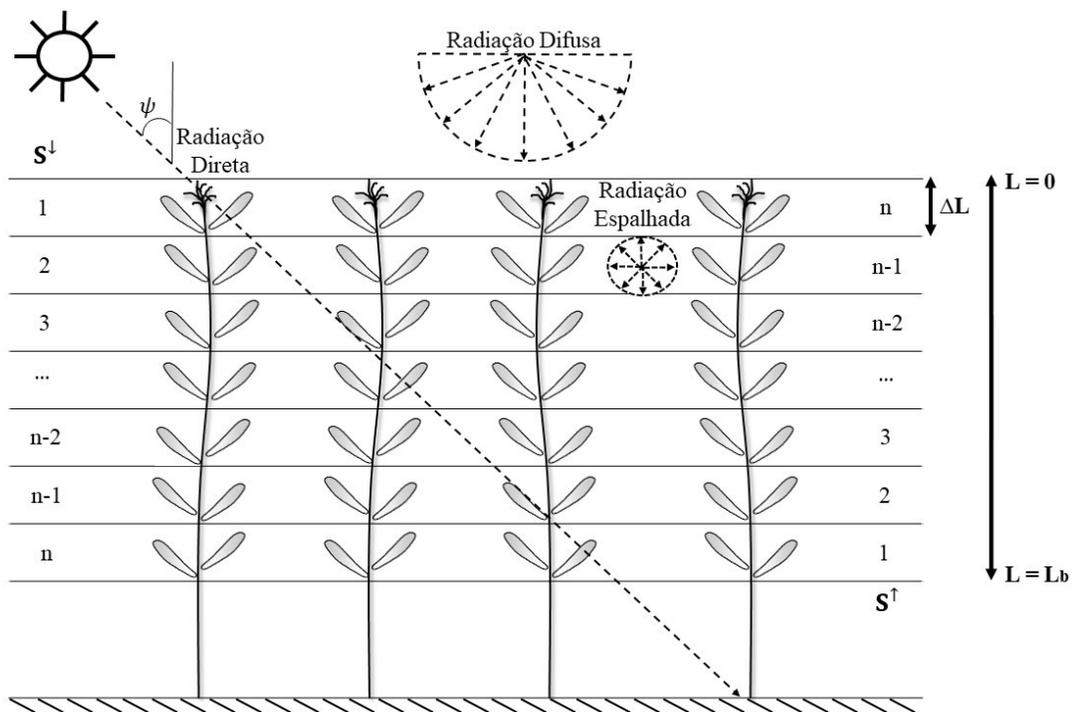
$$S^{\uparrow} = S_{L_b}^{\uparrow} = \alpha_{g_{\Lambda}}^{\mu} D_0 e^{-GL_b/\mu} + \alpha_{g_{\Lambda}}^d S^{\downarrow} \quad (4.8)$$

em que,  $S_{L_b}^{\uparrow}$  é o fluxo radiativo difuso no sentido ascendente no ponto espacial  $L_b$ . Ressalta-se que essas condições são aplicáveis para as duas bandas do espectro tratadas separadamente nesse modelo.

Assume-se a afirmação de Bonan (1996), que para uma superfície de solo em um mesmo comprimento de onda,  $\alpha_{g_{\Lambda}}^{\mu} = \alpha_{g_{\Lambda}}^d$ . Inicialmente, o valor utilizado para os albedos direto e difuso foi 0,10 para a banda do visível e 0,30 para a do infravermelho próximo propostos por Dickinson et al. (1981). Posteriormente, eles foram calibrados por meio de modelagem inversa. Destaca-se, que sempre se resguardou as relevâncias físicas apresentadas pela calibração.

## 4.5 Método Numérico

Apesar dos autores frequentemente resolverem o sistema de equações de forma analítica, este trabalho propõe a resolução por meio de um método numérico: o Método de Diferenças Finitas. Esse é um método de resolução de equações diferenciais que se baseia na aproximação de derivadas por diferenças finitas muito pequenas divididas em número finito de camadas dentro do dossel de vegetação conforme esquematizada na Figura 4.1. A fórmula de aproximação obtém-se da Série de Taylor da função derivada. Dessa forma, esse trabalho resolve o sistema por meio do método de Euler combinado com o *Shooting Method* nas camadas para melhor convergência.



**Figura 2.1** Esquema de resolução por diferenças finitas

O modelo considera os elementos de vegetação (folhas e galhos) distribuídos em número finito de  $n$  camadas. Cada camada vegetativa, possui densidade de área de elementos vegetativos, definida pelo IAF e pelo IAG. A radiação solar que incide no dossel por cima e a que entra por baixo tem referenciais diferentes, partindo da sua condição de contorno.

#### 4.5.1 Formulação explícita do Método das Diferenças Finitas

Sejam as derivadas aproximadas por diferenças finitas, tem-se:

$$\frac{dS^\uparrow}{dL} \approx \frac{S_{i+1}^\uparrow - S_i^\uparrow}{\Delta L} \quad (4.9a)$$

$$\frac{dS^\downarrow}{dL} \approx \frac{S_{i+1}^\downarrow - S_i^\downarrow}{\Delta L} \quad (4.9b)$$

Aplicando a aproximação nas equações originais ascendentes e descendentes (eqs. 4.3), obtém-se, respectivamente:

$$-\bar{\mu} \frac{S_{i+1}^\uparrow - S_i^\uparrow}{\Delta L} + (1 - (1 - \beta)\omega)S_i^\uparrow - \omega\beta S_i^\downarrow = \omega\beta_0\bar{\mu} \frac{G}{\mu} D_0 e^{-GL/\mu} \quad (4.10a)$$

$$\bar{\mu} \frac{S_{i+1}^\downarrow - S_i^\downarrow}{\Delta L} + (1 - (1 - \beta)\omega)S_i^\downarrow - \omega\beta S_i^\uparrow = \omega(1 - \beta_0)\bar{\mu} \frac{G}{\mu} D_0 e^{-GL/\mu} \quad (4.10b)$$

Ou seja,

$$S_{i+1}^\uparrow = \left(1 + \frac{\Delta L}{\bar{\mu}}(1 - (1 - \beta)\omega)\right)S_i^\uparrow - \frac{\Delta L\omega\beta}{\bar{\mu}}S_i^\downarrow - \Delta L\omega\beta_0 \frac{G}{\mu} D_0 e^{-GL/\mu} \quad (4.11a)$$

$$S_{i+1}^\downarrow = \left(1 - \frac{\Delta L}{\bar{\mu}}(1 - (1 - \beta)\omega)\right)S_i^\downarrow - \frac{\Delta L\omega\beta}{\bar{\mu}}S_i^\uparrow - \Delta L\omega(1 - \beta_0) \frac{G}{\mu} D_0 e^{-GL/\mu} \quad (4.11b)$$

#### 4.5.2 Formulação implícita do Método das Diferenças Finitas

Considera-se as seguintes equações:

$$-\bar{\mu} \frac{S_{i+1}^\uparrow - S_i^\uparrow}{\Delta L} + (1 - (1 - \beta)\omega)S_{i+1}^\uparrow - \omega\beta S_{i+1}^\downarrow = \omega\beta_0\bar{\mu} \frac{G}{\mu} D_0 e^{-GL/\mu} \quad (4.12a)$$

$$\bar{\mu} \frac{S_{i+1}^\downarrow - S_i^\downarrow}{\Delta L} + (1 - (1 - \beta)\omega)S_{i+1}^\downarrow - \omega\beta S_{i+1}^\uparrow = \omega(1 - \beta_0)\bar{\mu} \frac{G}{\mu} D_0 e^{-GL/\mu} \quad (4.12b)$$

Dessa forma, o desenvolvimento da equação 4.12a:

$$-\frac{\bar{\mu}}{\Delta L} S_{i+1}^{\uparrow} + (1 - (1 - \beta)\omega) S_{i+1}^{\uparrow} - \omega\beta S_{i+1}^{\downarrow} = \omega\beta_0 \bar{\mu} \frac{G}{\mu} D_0 e^{-GL/\mu} - \frac{\bar{\mu}}{\Delta L} S_i^{\uparrow} \quad (4.13)$$

Com isso, tem-se:

$$\left( -\frac{\bar{\mu}}{\Delta L} + (1 - (1 - \beta)\omega) \right) S_{i+1}^{\uparrow} - \omega\beta S_{i+1}^{\downarrow} = b_1 \quad (4.14)$$

em que,  $b_1 = \omega\beta_0 \bar{\mu} \frac{G}{\mu} D_0 e^{-GL/\mu} - \frac{\bar{\mu}}{\Delta L} S_i^{\uparrow}$

De forma similar, o desenvolvimento da equação 4.12b apresenta-se:

$$\frac{\bar{\mu}}{\Delta L} S_{i+1}^{\downarrow} + (1 - (1 - \beta)\omega) S_{i+1}^{\downarrow} - \omega\beta S_{i+1}^{\uparrow} = \omega(1 - \beta_0) \bar{\mu} \frac{G}{\mu} D_0 e^{-GL/\mu} + \frac{\bar{\mu}}{\Delta L} S_i^{\downarrow} \quad (4.15)$$

$$\left( \frac{\bar{\mu}}{\Delta L} + (1 - (1 - \beta)\omega) \right) S_{i+1}^{\downarrow} - \omega\beta S_{i+1}^{\uparrow} = b_2 \quad (4.16)$$

em que  $b_2 = \omega(1 - \beta_0) \bar{\mu} \frac{G}{\mu} D_0 e^{-GL/\mu} + \frac{\bar{\mu}}{\Delta L} S_i^{\downarrow}$

### 4.5.3 Formulação do *Shooting Method*

Sejam  $\eta = \frac{(1-(1-\beta)\omega)}{\bar{\mu}}$ ,  $\kappa = \frac{\omega\beta}{\bar{\mu}}$ ,  $\xi_1 = \omega(1 - \beta_0) \frac{G}{\mu} D_0 e^{-GL/\mu}$  e  $\xi_2 = -\omega\beta_0 \frac{G}{\mu} D_0 e^{-GL/\mu}$ . Seja

o vetor

$$\mathbf{s} = \begin{pmatrix} S^{\downarrow} \\ S^{\uparrow} \end{pmatrix} \quad (4.17)$$

Dessa forma, tem-se o sistema

$$\mathbf{S}' = \begin{pmatrix} -\eta & \kappa \\ -\kappa & \eta \end{pmatrix} \mathbf{S} + \begin{pmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \end{pmatrix}, \quad S^\downarrow(a) = S_a^\downarrow, \quad S^\uparrow(b) = S_b^\uparrow \quad (4.18)$$

Consideram-se os Problemas de Valor Inicial (PVI) auxiliares a seguir,

$$\mathbf{u}' = \begin{pmatrix} -\eta & \kappa \\ -\kappa & \eta \end{pmatrix} \mathbf{u} + \begin{pmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{u}(a) = \begin{pmatrix} S_a^\downarrow \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4.19a)$$

e

$$\mathbf{v}' = \begin{pmatrix} -\eta & \kappa \\ -\kappa & \eta \end{pmatrix} \mathbf{v}, \quad \mathbf{v}(a) = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4.19b)$$

Para resolver os PVI, utiliza-se o método de Euler, como mencionado anteriormente,

$$\mathbf{u}_{i+1} = \mathbf{u}_i + \Delta L f_1(\mathbf{u}, \mathbf{v}) \quad (4.20a)$$

$$\mathbf{v}_{i+1} = \mathbf{v}_i + \Delta L f_2(\mathbf{u}, \mathbf{v}) \quad (4.20b)$$

Ao resolver-se os PVI, obtêm-se  $\mathbf{u}(b)$  e  $\mathbf{v}(b)$ . Considera-se o vetor  $\mathbf{w}$  como solução de (4.18), tal que,

$$\mathbf{w} = \mathbf{u} + \theta \mathbf{v}, \quad \theta = \text{constante} \quad (4.21)$$

Com isso,

$$\mathbf{w}' = \begin{pmatrix} -\eta & \kappa \\ -\kappa & \eta \end{pmatrix} \mathbf{w} + \begin{pmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{w}(a) = \begin{pmatrix} S_a^\downarrow \\ \theta \end{pmatrix} \quad (4.22)$$

Ou seja,

$$\mathbf{w}(b) = \begin{pmatrix} u_1(b) + \theta v_1(b) \\ u_2(b) + \theta v_2(b) \end{pmatrix} \quad (4.23)$$

Pretende-se que  $\mathbf{w}_2(b) = S_b^\uparrow$ . Portanto,

$$u_2(b) + \theta v_2(b) = S_b^\dagger \quad (4.24)$$

Isto é,

$$\theta = \frac{S_b^\dagger - u_2(b)}{v_2(b)} \quad (4.25)$$

Obtêm-se então:

$$\mathbf{w} = \mathbf{u} + \frac{S_b^\dagger - u_2(b)}{v_2(b)} \mathbf{v} \quad (4.26)$$

Ou, em termos da função incógnita, e com o subscrito para indicar o procedimento iterativo, tem-se

$$\mathbf{S}_k = \mathbf{u}_k + \frac{S_b^\dagger - u_2(b)}{v_2(b)} \mathbf{v}_k \quad (4.27)$$

Para resolver, é necessária a verificação de  $\|\mathbf{S}_k - \mathbf{S}_{k-1}\|$  para satisfazer o critério de convergência.

#### 4.6 Modelagem Inversa

Para resolver o sistema de Equações Diferenciais Ordinárias são necessários parâmetros como  $\alpha_{g\Lambda}^\mu = \alpha_{g\Lambda}^d = \alpha_{g,VIS}$ ,  $\alpha_{g\Lambda}^\mu = \alpha_{g\Lambda}^d = \alpha_{g,IV}$ ,  $\rho_{vis}$ ,  $\rho_{iv}$ ,  $\tau_{vis}$  e  $\tau_{iv}$ . Dados os parâmetros resolve-se o Problema Direto. Uma vez desconhecido os parâmetros, porém com dados experimentais é possível recuperar o valor desses parâmetros por meio de Problemas Inversos. Suponha que  $\mathbf{S}_{exp}$  seja os dados coletados experimentalmente, e que  $\mathbf{S}_{calc}(\mathbf{X})$  seja a solução do Problema Direto condicionado ao conjunto de parâmetros  $\mathbf{X}$ . Para determinar os parâmetros deseja-se minimizar o funcional

$$f(\mathbf{X}) = \sum \sqrt{S_{exp} - S_{calc}(X)} \quad (4.28)$$

Para resolver o problema de minimização do funcional existem métodos determinísticos e probabilísticos. Um dos métodos mais tradicionais é o de Levenberg-Marquadt, um método determinístico, porém que não retorna bons resultados para um número grande de parâmetros. Desta forma, foi escolhido o método de Luss-Jaakola. Este método foi proposto por Luus e Jaakola (1973) para resolver problemas de programação não-linear por meio da otimização. Este é um método probabilístico para resolver problemas de máximos e mínimos com restrições.

Para iniciar o método de Luus-Jaakola é necessário conhecer o comportamento dos parâmetros a serem determinados, pois serão neles a imposição das restrições. Definimos o vetor solução do Problema Inverso por

$$\mathbf{X} = [x_1, \dots, x_7] = [\chi, \alpha_{g,VIS}, \alpha_{g,IV}, \rho_{vis}, \rho_{iv}, \tau_{vis}, \tau_{iv}] \quad (4.29)$$

e as restrições definidas por

$$MAXI = [x_{1,m\acute{a}x}, \dots, x_{7,m\acute{a}x}] \quad (4.30a)$$

$$MINI = [x_{1,min}, \dots, x_{7,min}] \quad (4.30b)$$

em que, os máximos e mínimos são determinados conforme encontrados na literatura. Pretende-se então minimizar o funcional dado em (4.28) para determinar  $\mathbf{X}$  sob as restrições dadas em *MAXI* e *MINI*.

Considere uma quantidade  $p$  de valores aleatórios para cada um dos parâmetros a ser determinado. Denota-se, o primeiro “chute” ou valores iniciais, o conjunto inicial dado por

$$x_{i,j} = [x_{1,j}, \dots, x_{7,j}] \quad (4.31)$$

em que  $x_{i,j} \in [x_{i,min}; x_{i,max}]$  e  $j = 1:p$ . Seja também o espaço de busca inicial ( $r_i^k$ ) para cada variável,

$$r_i^k = [r_1^k, \dots, r_7^k] \quad (4.32)$$

em que  $k$  é a quantidade de *loops* externos, ou total de vezes que serão dados chutes aleatórios, e  $r_i^k$  é definido como a amplitude do intervalo de busca de  $x_i$ , na iteração  $k$ , que na primeira iterada é calculado por

$$r_i^{(0)} = MAXI - MINI \quad (4.33)$$

Para iniciar o processo iterativo, define-se o índice iterativo  $k = 1$  e lê-se uma quantidade  $p$  de números aleatórios, denotados por  $y_{i,j}$ , entre  $-0,5$  e  $0,5$ , e atribua-os a  $x_1, \dots, x_7$ , calculado por

$$x_{i,j}^k = x_{i,j}^{k-1} + y_{i,j} r_{i,j}^{k-1}, \quad i = 1, \dots, 7; j = 1, \dots, p \quad (4.34)$$

Para cada conjunto, fixando-se  $j$ , testam-se as restrições dos coeficientes apresentadas nas eqs. 4.30. Caso a estimativa esteja fora do intervalo de busca, o coeficiente é definido como o limite inferior ou superior conforme o caso. Então, calcula-se os valores do modelo, representado de forma geral por  $S_{calc}(X)$ .

Desta forma, com a solução do Problema Direto condicionado ao conjunto aleatório de parâmetros, encontra-se o conjunto que melhor minimiza o funcional  $f(X)$ , até o momento, ou seja, o melhor valor de  $f$  e o correspondente  $x_{i,j}, i = 1, \dots, 7$ .

Neste passo, incrementa-se  $k$  em 1. Nesse caso,  $k$  representa o número de iterações externas ou quantas repetições do processo serão realizadas e  $p$  o número iterações internas, ou seja, que ocorrerão a cada passo externo. Se o número de iterações externas atingiu o máximo previamente determinado, o problema é interrompido. Senão, reduz-se a amplitude do intervalo por um valor  $\varepsilon$  (por exemplo, 0,05):

$$r_i^{(j)} = (1 - \varepsilon) r_i^{(j-1)}, \quad 0 < \varepsilon < 1 \quad (4.35)$$

Retorna a ler uma quantidade  $p$  de números aleatórios entre  $-0,5$  e  $0,5$  (eq. 4.34) e segue novamente os outros passos.

#### **4.7 Scilab**

Foi escolhido o ambiente Scilab, um *software* científico para computação numérica, pois permite principalmente a implementação de um modelo que varia no tempo e no espaço simultaneamente, inclui diversas funções matemáticas, com a possibilidade de adicionar interativamente programas de várias linguagens como FORTRAN, C, C++ e Java. Possui sofisticadas estruturas de dados, que incluem listas, polinômios, sistemas lineares, e é um interpretador de linguagem de programação de alto nível. Apesar de conter diversos pacotes disponíveis para utilização, esse trabalho foi desenvolvido sem o auxílio desses. Ademais, é gratuito e sem restrições de reprodução por demais usuários.

#### **4.8 Análise Estatística**

A avaliação do modelo quanto às suas estimativas em relação às observações dos processos da superfície terrestre foi feita com base em dois conceitos. O primeiro é a precisão, ou seja, o grau em que as estimativas previstas pelo modelo são consistentes com a teoria científica prevalecente. Trata sobre os erros aleatórios dos dados coletados (PEREIRA et al., 2002). O segundo é a exatidão, infere sobre a flutuação dos dados observados em relação aos valores estimados. É esse conceito que abrange os erros sistemáticos identificados (WILLMOTT et al., 1985). Para isso, os dados experimentais foram utilizados para avaliar o desempenho do modelo em representar o processo modelado.

##### **4.8.1 Parâmetros ajustados por modelagem inversa da radiação incidente**

Os modelos que tiveram os parâmetros ajustados pelo método dos mínimos quadrados foram avaliados estatisticamente por meio dos índices: p-valor, teste de normalidade Shapiro-Wilk, coeficiente da regressão ( $R^2$ ) e erro padrão de estimativa (*EPE*). Ademais, cada parâmetro estimado para os modelos foi analisado em relação ao p-valor.

O p-valor indica a probabilidade de se obter uma estatística de teste igual ou mais extrema em relação aos dados observados. Tradicionalmente, o nível de significância é de 0,05, o que significa que, quando não há nenhuma diferença entre os dados estimados e observados, um valor tão extremo para a estatística de teste é esperado em menos de 5 % das vezes.

Para complementar o p-valor, o teste de normalidade de Shapiro-Wilk tem como objetivo fornecer uma estatística de teste para avaliar se os dados estimados têm distribuição Normal. Ou seja, considerando que a hipótese nula do teste de Shapiro-Wilk indica uma distribuição normal, se o p-valor for menor que o valor de corte escolhido, a hipótese nula é rejeitada e há evidências de que os dados testados não são normalmente distribuídos. Entretanto, se o p-valor for maior que o valor de corte escolhido, a hipótese nula de que os dados vieram de uma população normalmente distribuída não pode ser rejeitada (TORMAN et al., 2012).

O coeficiente  $R^2$  é utilizado para inferir apenas sobre a precisão das estimativas dadas pelo coeficiente ajustado em relação à grandeza observada por meio do modelo de regressão linear ( $P = a + b O$ ), em que  $P$  é o dado simulado e  $O$  é o observado. Porém, o  $R^2$  por si só é insuficiente para avaliar o desempenho das estimativas do modelo. Na verdade, altos valores de  $R^2$  podem ser enganosos pois esses são normalmente não relacionados ao tamanho da diferença entre a estimativa e a observação (WILLMOTT, 1982).

$$R^2 = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 + \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right]^2 \quad (4.36)$$

O erro padrão de estimativa e da média é utilizado para mensurar a precisão do coeficiente estimado comparando o modelo ao valor observado. Quanto menor o erro padrão, mais precisa é a estimativa (PEREIRA et al., 2009).

$$EPE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n - 1}} \quad (4.37)$$

#### 4.8.2 Índices estatísticos utilizados

A avaliação das estimativas foi feita por meio dos índices estatísticos: coeficiente da regressão ( $r^2$ ), que infere sobre a precisão do modelo; o coeficiente de concordância de Willmott ( $d$ ), o quadrado médio do erro ( $QME$ ), a raiz do quadrado médio do erro absoluto e percentual ( $RQME$ ) são responsáveis por quantificar a exatidão das estimativas; e parcelas de  $QME$  sistemática ( $QMEs$ ) e não-sistemática ( $QMEu$ ) apontam para as possíveis origens dos erros.

Assim como o índice  $R^2$  (eq. 4.36), o  $r^2$  também é utilizado para inferir sobre a precisão das estimativas em relação as observações. Entretanto, nesse caso é feita a avaliação quanto ao teste do modelo, enquanto que  $R^2$  é utilizado para avaliar o ajuste dos parâmetros.

O índice de Willmott ( $d$ ), proposto por Willmott et al. (1985), é uma medida descritiva que reflete sobre a exatidão dos valores estimados em relação aos observados e é calculado como (PEREIRA et al., 2009):

$$d = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n ((|P_i - \bar{O}|) + (|O_i - \bar{O}|))^2} \right] \quad (4.38)$$

Por sofrer menos alteração por pontos singulares (ou “outliers” em Inglês), o  $QME$  é considerado preciso e robusto como medida da habilidade de modelos numéricos em reproduzir a realidade. Porém, é sensível aos grandes erros, por elevar as diferenças individuais ao quadrado. Quando o  $QME$  é zero, indica simulação perfeita. O  $QME$  é definido por (HALLAK e PEREIRA FILHO, 2011):

$$QME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 \quad (4.39)$$

Para complementar o  $QME$ , o  $RQME$  em sua forma absoluta e percentual é também utilizado para expressar a acurácia dos resultados numéricos com a vantagem de apresentar valores do erro nas mesmas dimensões da variável analisada. Este é expresso por (HALLAK e PEREIRA FILHO, 2011):

$$RQME = \sqrt{QME} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (4.40a)$$

$$RQME(\%) = \frac{RQME}{\bar{O}} \quad (4.40b)$$

Esses índices que inferem sobre a exatidão não estabelecem quais tipos de erro são pertinentes aos modelos utilizados. Dessa forma, é necessário a determinação separada para identificação de possíveis origens para esses erros: o erro sistemático ( $QME_s$ ) é causado por fontes identificáveis, que fazem com que os dados estimados estejam consistentemente acima ou abaixo do valor observado; o erro não-sistemático ( $QME_u$ ) é aleatório e representado por flutuações nos dados estimados. Por isso, o  $QME_s$  está relacionado a erros de precisão e o  $QME_u$ , a erros de exatidão. Estes são calculados conforme equações abaixo:

$$QME_s = QME_a + QME_p + QME_i \quad (4.41)$$

em que,  $QME_a$  é o erro sistemático aditivo,  $QME_p$  é o erro sistemático proporcional e o  $MSE_i$  é o erro sistemático de interdependência entre  $QME_a$  e  $QME_p$ , e são determinados como apresentado abaixo:

$$QME_a = a^2 \quad (4.42a)$$

$$QME_p = (b - 1)^2 \left( \frac{\sum_{i=1}^n O_i^2}{n} \right) \quad (4.42b)$$

$$QME_i = 2a(b - 1)\bar{O} \quad (4.42c)$$

O  $QME_u$  é obtido por meio da seguinte equação:

$$QME_u = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}{n} \quad (4.43)$$

## 4.9 Fluxograma da Metodologia

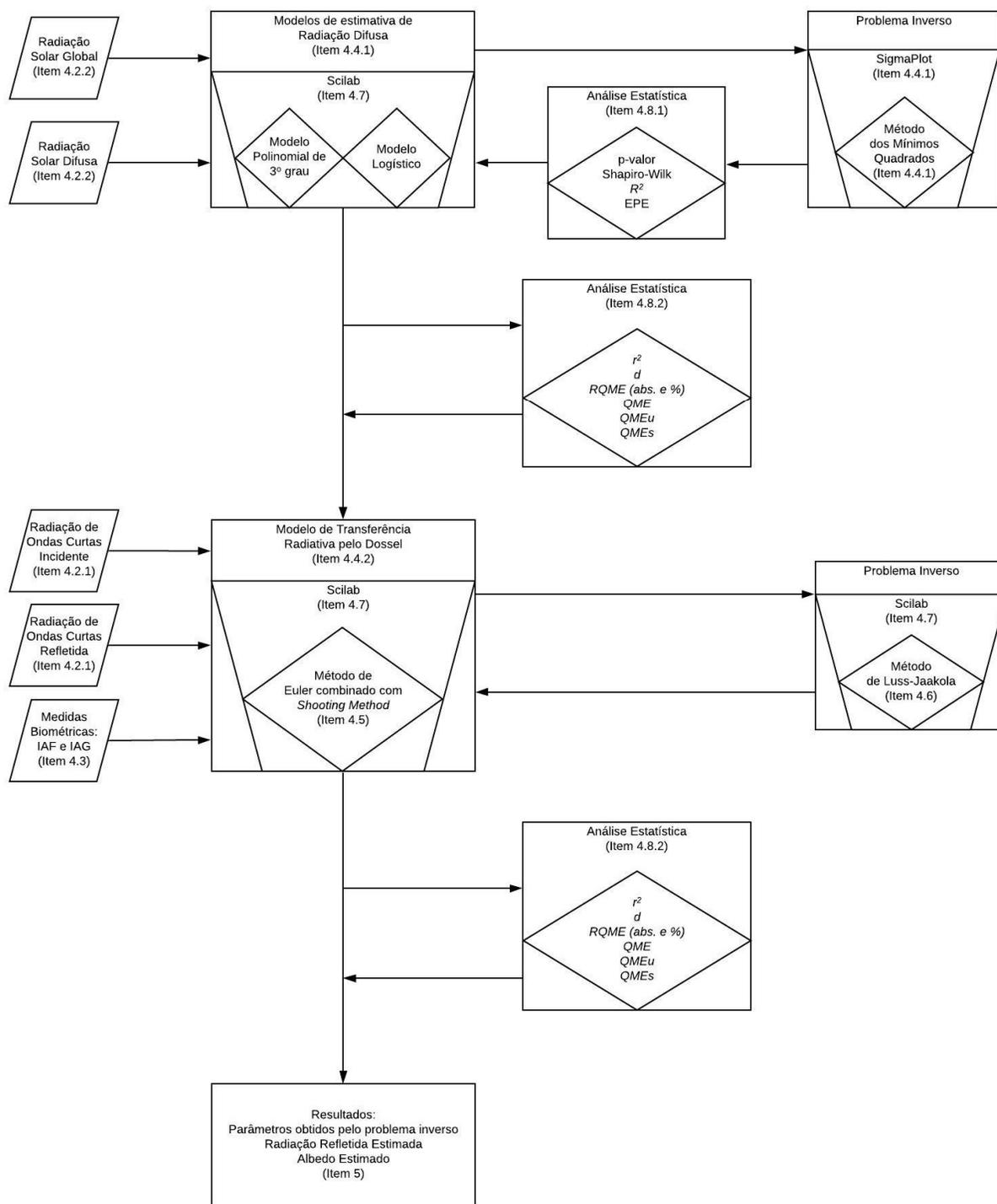


Figura 4.2 Fluxograma da metodologia aplicada.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Modelos de Radiação Solar Direta e Difusa

O resultado do p-valor para a análise de variância (ANOVA) de ambos os modelos foi abaixo do valor estabelecido de nível de significância de 0,05, ou seja, em menos de 0,0001 e de 0,0007 das vezes, no caso do modelo polinomial de 3º e logístico, respectivamente, estes retornaram um valor extremo ao apresentado pelos dados observados. Com isso, a partir do valor de corte do p-valor e do índice  $W$ , que retornou valores de 0,9383 para o modelo logístico e 0,9571 para o polinomial, ambos os modelos passaram no teste de normalidade de Shapiro-Wilk (Tabela 5.1). Este resultado indicou que os dois modelos apresentaram distribuição normal e tiveram representação estatisticamente significativa.

Ademais, o ajuste do modelo polinomial apresentou maior  $R^2$  e o menor  $EPE$  em relação ao modelo logístico (Tabela 5.1), apesar de o modelo logístico ter apresentado resultados satisfatórios ( $R^2 > 0,93$  e  $EPE = 0,0447$ ). Esse resultado indicou que o modelo polinomial explicou melhor a variabilidade de  $k_d$  em função de  $k_t$  e mostrou menor erro em relação ao logístico. Isso ocorreu, pois, o modelo logístico não estimou adequadamente  $k_d$ , principalmente para valores de  $k_t$  menores que 0,4, quando se apresentam maiores valores de  $k_d$  (Figura 5.1). Esse modelo atingiu patamar que não representou o observado pelas medidas. O modelo polinomial não apresentou tendência a um patamar e, assim, conseguiu descrever os maiores (menores) valores de  $k_d$ , quando se observou os menores (maiores)  $k_t$ . Vale ressaltar que, devido aos dados utilizados se tratarem de médias horárias dos meses em que houve coleta, valores mais altos ( $k_t > 0,7$ ) e valores mais baixos ( $k_t < 0,1$ ) acabaram sendo amortizados.

Os parâmetros dos dois métodos empíricos para estimar a fração  $k_d$  (irradiação solar global e sua componente difusa), baseados na análise de dispersão entre  $k_d$  e os dados horários de  $k_t$ , foram avaliados quanto a sua significância por meio do p-valor (Tabela 5.1). Os parâmetros empíricos  $a$ ,  $b$  e  $c$  de ambos os modelos tiveram resultados para o p-valor acima do limite estabelecido de 0,05, o que indicou que os parâmetros não correspondem a hipótese de serem diferentes de zero.

Entretanto, a consideração de insignificância destes mudaria a forma da curva descrita pelos modelos, por isso estes não foram descartados. Os outros parâmetros atenderam ao nível de significância estabelecido.

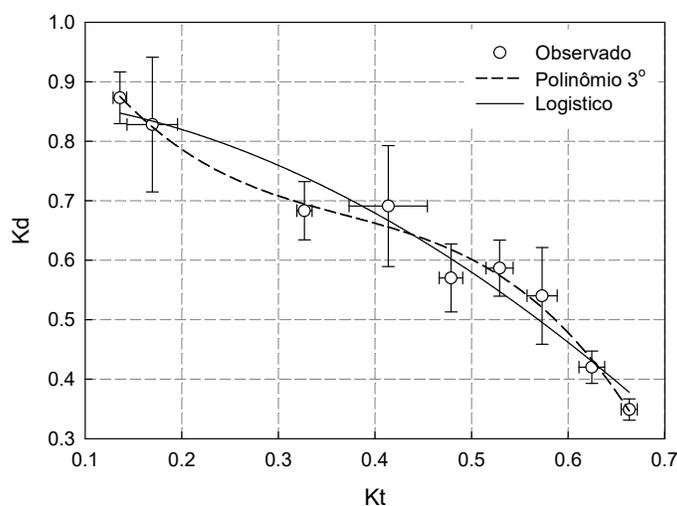
**Tabela 5.1** Valor e análise dos parâmetros empíricos ajustados e índices estatísticos para avaliação dos modelos logístico e Polinomial de 3°

	polinomial de 3°		logístico	
	parâmetros	p-valor	parâmetros	p-valor
<b>a</b>	-7,8966	0,0558	<b>a</b> -1263,9096	0,9991
<b>b</b>	8,7311	0,0751	<b>b</b> 1264,7832	0,9991
<b>c</b>	-3,6492	0,0511	<b>c</b> 45,7864	0,9983
<b>d</b>	1,2301	0,0004	<b>d</b> 1,8523	0,0458
<b>p-valor</b>	< 0,0001		0,0007	
<b>Shapiro-Wilk</b>	0,7675		0,5639	
<b>R<sup>2</sup></b>	0,9707		0,9332	
<b>EPE</b>	0,0296		0,0447	

Segundo Iqbal (1983), valores de  $k_t$  menores que 0,3 representam dias com elevado grau de nebulosidade. De fato,  $k_t$  é um parâmetro que está fortemente associado a nebulosidade local. Para se avaliar adequadamente  $k_t$ , faz-se necessário melhor caracterizar o estado atmosférico médio, tanto em relação a concentração de gases e aerossóis, quanto em relação ao tipo, altura, espessura e número de camadas das nuvens. Ainda, as características climáticas locais podem não ser representadas adequadamente por certos modelos empíricos. Nas Figuras 5.3 e 5.4, são apresentados os valores médios horários de  $k_t$  por mês utilizado para teste.

Paulescu e Blaga (2016) observaram que dados coletados para Timisoara, Romênia, indicam duas regiões distintas da correlação entre  $k_d$  e  $k_t$ : uma com pequena correlação positiva sob a maior parte do céu nublado (para  $k_t < 0,247$ ,  $k_d$  varia de aproximadamente 0,9 a 1) e outra com forte correlação negativa sob a maior parte do céu limpo (para  $k_t > 0,247$ ,  $k_d$  varia de aproximadamente 1 a 0). Marques Filho et al. (2016) mostraram que para os dados coletados no Rio de Janeiro, uma função sigmoide concorda melhor com o padrão da curva experimental, apesar de ressaltarem que a função logística ajustada aos dados do Rio de Janeiro melhorou o desempenho estatístico do modelo.

Na avaliação do teste das estimativas de  $k_d$ , o modelo logístico apresentou resultado inferior ao modelo polinomial quanto a sua precisão, ou seja, relativo ao coeficiente de determinação ( $r^2$ ) entre os valores estimados e observados. Quanto a exatidão dos modelos, o modelo polinomial novamente apresentou menores  $RQME$  e  $QME$ , e maior coeficiente de concordância de Willmott ( $d$ ). Ainda, ambos os modelos apresentaram maior percentual de erros não-sistemáticos ( $> 70\%$ ), ou seja, de origens aleatórias e de difícil identificação (Tabela 5.2). Uma maior exatidão do modelo polinomial de 3º infere que há dispersão menor entre os pontos na relação linear entre os dados estimados e observados que o modelo logístico (Figura 5.2).



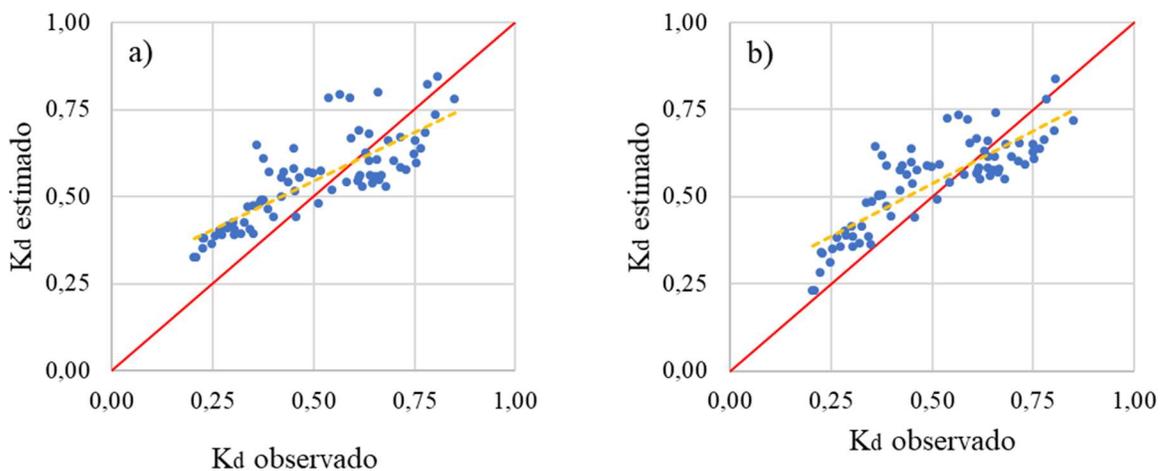
**Figura 5.1** Relação entre a transmitância atmosférica global ( $k_t$ ) e a fração de irradiância solar difusa em relação a global ( $k_d$ ) médias horárias.

Ambos os modelos apresentaram tendência a superestimativa de  $k_d$  quando tratando dos menores valores ( $< 0,6$ ) dessa variável, ou seja, nos horários próximos ao meio dia solar, quando se observa os maiores valores de  $Q_g$  e menores valores relativos de  $S_0^\downarrow$  para o dia. Por outro lado, quando se tem maiores valores de  $k_d$  ( $> 0,6$ ), observou-se tendência a subestimativa do mesmo (Figura 5.2). Na média, com base no coeficiente de inclinação das regressões lineares, os dois modelos resultaram em superestimativa de  $k_d$ : 2,58 % no modelo logístico e 1,74 % no modelo polinomial de 3º.

Marques Filho et al. (2016) mostraram os resultados da análise estatística para o modelo sigmoide horário apresentado e compararam a outros modelos ajustados para locais no Hemisfério Sul e que tiveram influência de fatores marinhos. Para o modelo sigmoide proposto para o Rio de

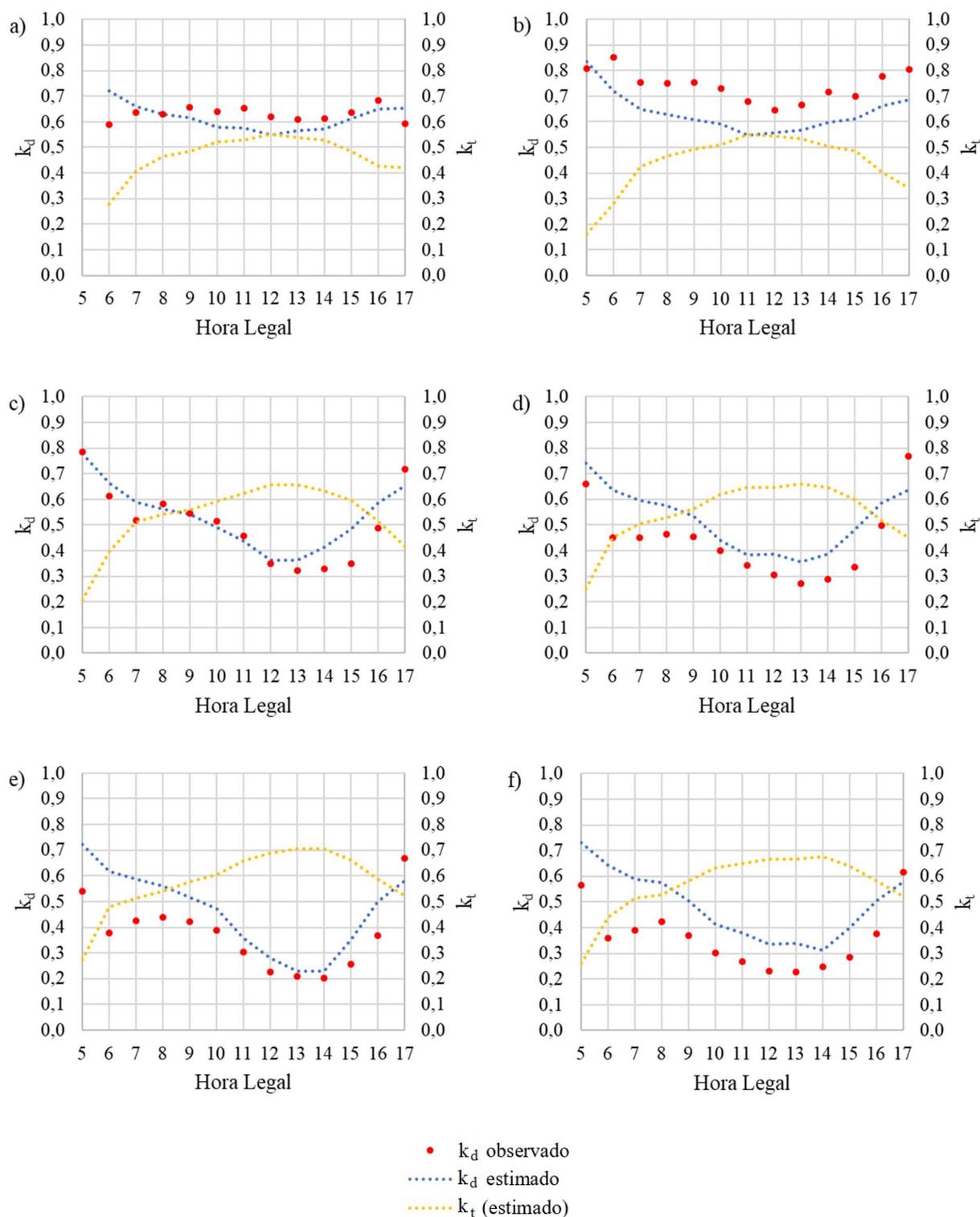
Janeiro, os autores encontraram  $r^2$  igual a 0,861 enquanto os outros modelos apresentados tiveram resultados na faixa de 0,85. O  $RQME$  percentual apresentou menor erro para o modelo sigmoide ( $RQME = 27,18\%$ ). Os outros modelos apresentaram  $RQME$  entre 27,99 e 30,36%. O índice  $d$  foi maior para o modelo sigmoide ( $d = 0,977$ ) apesar de todos os modelos apresentados terem divergência na terceira casa decimal.

Paulescu e Blaga (2016) avaliaram o teste de modelos de estimativa de  $k_d$  com 1, 2 e 4 preditores e com horas de brilho solar relativa como preditor. Dentre estes modelos, a maior precisão, expressa pelo  $r^2$ , encontrada para a área experimental foi 0,930 e a menor foi 0,605. Quanto a exatidão dos modelos testados, avaliada pelo  $RQME$ , os autores informaram o maior valor encontrado de 0,236 e o menor erro foi de 0,103.

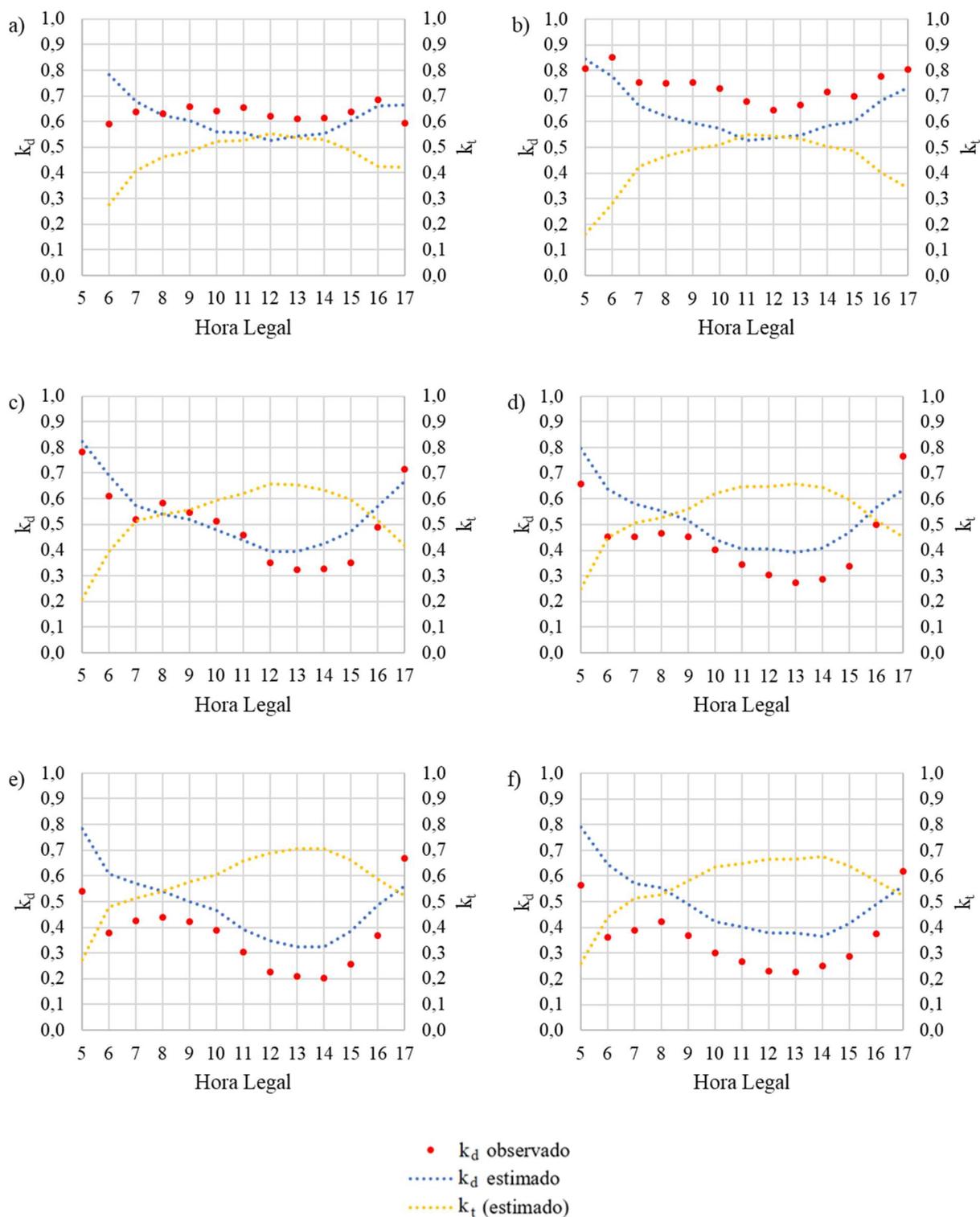


**Figura 5.2** Relação linear entre  $k_d$  observado e estimado pelos modelos: a) Logístico e b) Polinomial de 3°

Ademais, a proximidade dos resultados estatísticos dos dois modelos testados foi observada na sua estimativa horária conforme apresentados nas Figuras 5.3 e 5.4. Na estimativa de  $k_d$ , observaram-se que os maiores erros ocorrem antes das 8 h da manhã.



**Figura 5.3** Relação de  $k_t$  e  $k_d$  horário médio mensal pelo modelo polinomial de 3º para os meses de teste: a) julho; b) agosto; c) setembro; d) outubro; e) novembro; f) dezembro.



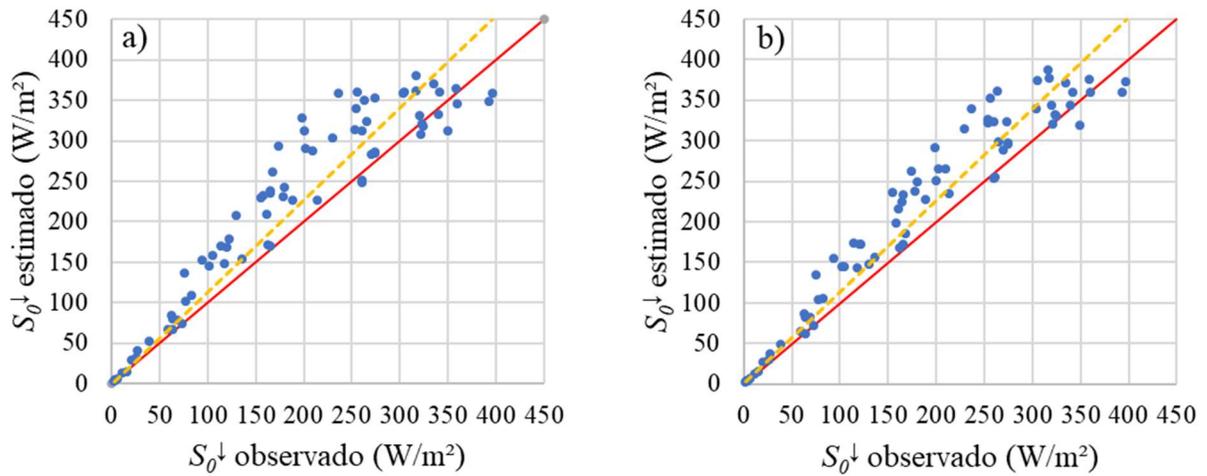
**Figura 5.4** Relação de  $k_t$  e  $k_d$  horário médio mensal pelo modelo logístico para os meses de teste: a) julho; b) agosto; c) setembro; d) outubro; e) novembro; f) dezembro.

Na avaliação do teste de  $S_0^\downarrow$  estimado pelo modelo polinomial em função de  $k_d$  ajustado apresentou maior precisão em relação aos dados observados que o modelo logístico indicado pelo  $r^2$  (Tabela 5.2). Quanto a exatidão, a  $RQME$  mostrou-se menor para o modelo polinomial comparando-se ao encontrado para o modelo logístico, ou seja, caracterizou estimativas com menor erro. O resultado observado no  $QME$  corroborou com as análises de  $RQME$ . Também quanto a concordância, indicada pelo índice  $d$ , o modelo polinomial também retornou resultados melhores. Ainda, ambos os modelos apresentaram maior percentual de erros não-sistemáticos ( $> 50\%$ ), ou seja, de origens aleatórias e de difícil modelagem e correção.

O modelo polinomial apresentou tendência de superestimar  $S_0^\downarrow$  próximo ao meio dia solar, quando se observam para valores acima de  $50 \text{ W m}^{-2}$ , horário de maior incidência de radiação solar (Figura 5.5b). Em oposição, observou-se no modelo logístico que, para essa faixa de valores elevados de  $S_0^\downarrow$ , o modelo apresentou diminuição na tendência de superestimativa dos valores observados (Figura 5.5a). O afastamento gradativo das estimativas feitas pelos modelos da linha ideal, conforme o aumento de  $S_0^\downarrow$ , demonstraram a tendência do erro sistemático. Na média, com base no coeficiente de inclinação das regressões lineares, os dois modelos resultaram em superestimativa de  $S_0^\downarrow$ :  $13,51\%$  ( $33,55 \text{ W m}^{-2}$ ) para o modelo logístico e  $12,95\%$  ( $30,34 \text{ W m}^{-2}$ ) para o polinomial.

**Tabela 5.2** Índices estatísticos para avaliação de  $k_d$  e de  $S_0^\downarrow$  dos modelos polinomial de 3° e logístico

	logístico		polinomial de 3°	
	$k_d$	$S_0^\downarrow$	$k_d$	$S_0^\downarrow$
$r^2$	0,638	0,895	0,690	0,932
$d$	0,846	0,952	0,876	0,965
$RQME (W/m^2)$	0,12	51,60	0,11	44,05
$RQME (\%)$	23%	28%	21%	24%

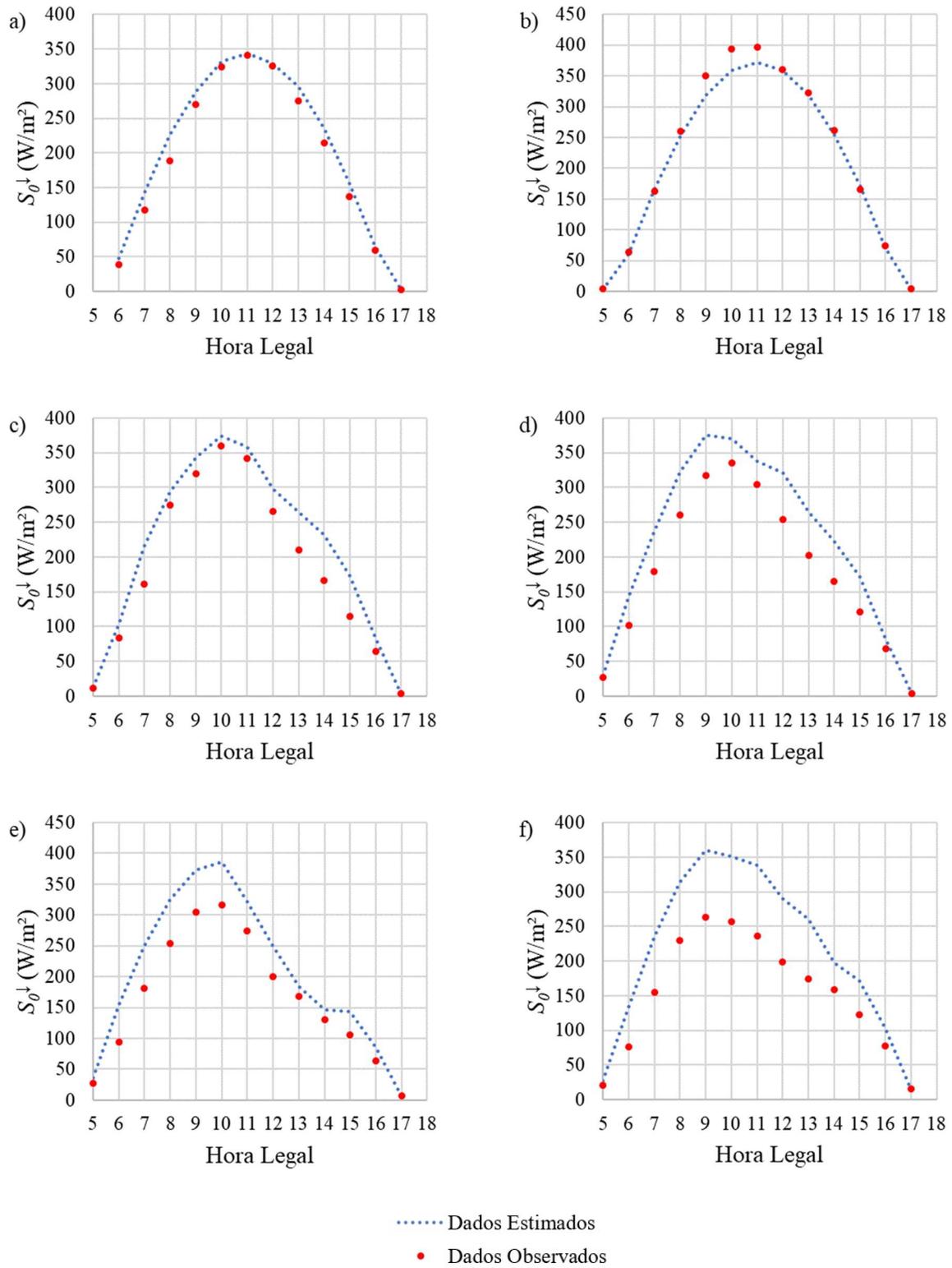


**Figura 5.5** Relação linear entre  $S_0^\downarrow$  observado e estimado pelos modelos: a) logístico e b) polinomial de 3°

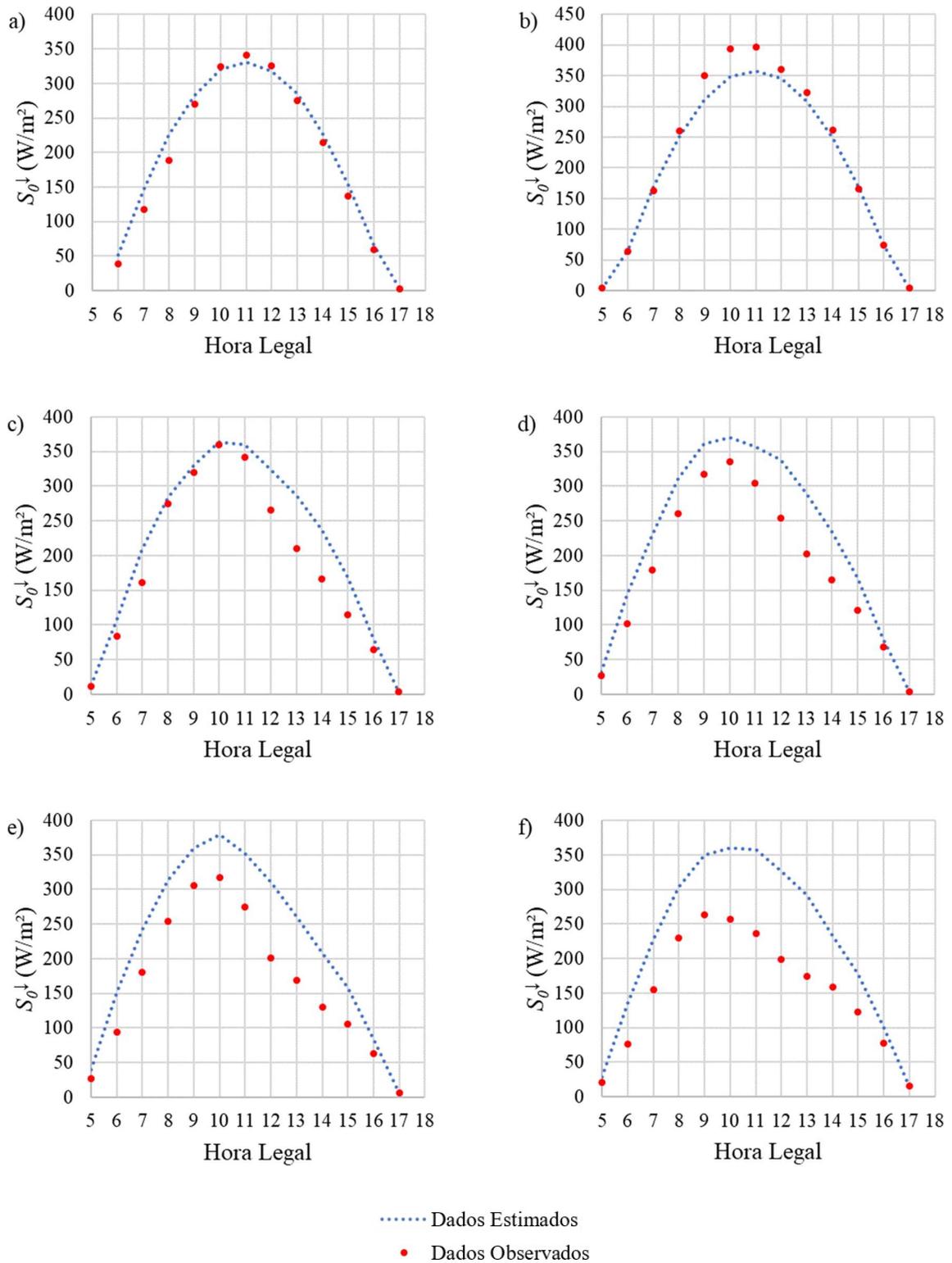
Eftimie (2011), que propôs 12 equações polinomiais de segundo e terceiro grau ajustadas para cada mês para determinar a radiação difusa diária para a área urbana de Braşov, Romênia, encontrou  $r^2$  médio para avaliação dos modelos de 0,8493 e concluiu que estes modelos são aplicáveis com alta precisão.

Escobedo et al. (2014) apresentaram a avaliação de quatro diferentes modelos para estimar a incidência de radiação difusa horária em superfícies inclinadas. Para a inclinação de  $12,85^\circ$ , encontraram resultados de  $RQME$  ( $\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ) entre 0,1093 e 0,1175 e do índice  $d$  entre 0,9954 e 0,9960. A inclinação de  $22,85^\circ$  apresentou resultados de  $RQME$  ( $\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ) entre 0,1089 e 0,1302 e do índice  $d$  entre 0,9967 e 0,9978. Por último, este informou os resultados para inclinação de  $32,85^\circ$  do  $RQME$  ( $\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ) entre 0,1533 e 0,1901 e do índice  $d$  entre 0,9931 e 0,9953.

Confirmando o resultado da relação linear (Figura 5.5), nas Figuras 5.6 e 5.7 foi observado maior tendência a superestimativa do modelo em relação aos dados observados nos horários próximos ao meio-dia solar, com exceção de agosto, que se observou subestimativa de ambos os modelos para esses horários.



**Figura 5.6** Relação de  $S_0^{\downarrow}$  horário médio mensal pelo modelo polinomial de 3º para os meses de teste: a) julho; b) agosto; c) setembro; d) outubro; e) novembro; f) dezembro.

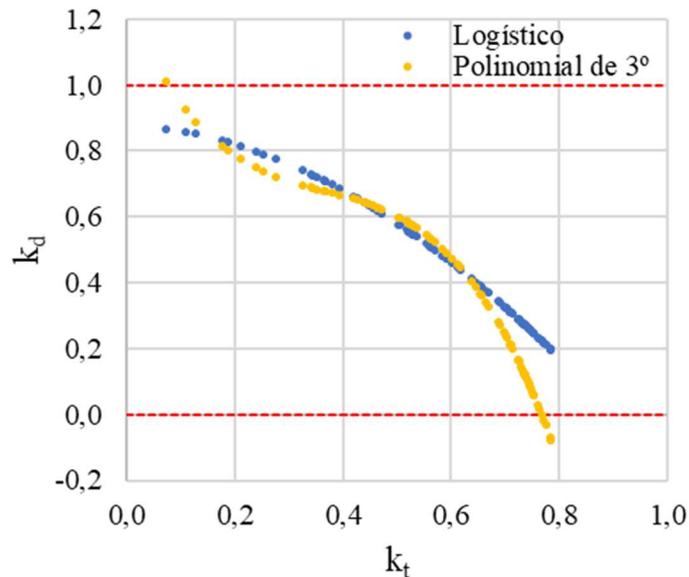


**Figura 5.7** Relação de  $S_0^{\downarrow}$  horário médio mensal pelo modelo logístico para os meses de teste: a) julho; b) agosto; c) setembro; d) outubro; e) novembro; f) dezembro.

## 5.2 Modelo de Balanço de Radiação Solar

### 5.2.1 Modelagem inversa – otimização

Os dados usados para ajustar o modelo de separação das componentes da radiação solar global foram médias mensais entre os anos medidos para cada horário. Com isso, há amortização dos horários de muita insolação. Logo, como apresentado na Figura 5.1, o ajuste foi realizado para  $0,1 < k_t < 0,7$ . Dessa forma, apesar do modelo polinomial de 3º ter apresentado melhores resultados, quando extrapolado para valores de  $k_t$  maiores que 0,7, este retornou resultados negativos para a componente difusa da radiação solar (Figura 5.8). Por esse motivo, o modelo logístico foi utilizado. Entretanto, ambos os modelos apresentaram erros na representação dessa divisão entre as componentes por se tratar de uma extrapolação. Apesar disso, os parâmetros atingidos pela modelagem inversa (Tabela 5.3) obtidos foram fisicamente coerentes.



**Figura 5.8** Relação entre a transmitância atmosférica global ( $k_t$ ) e a fração de irradiância solar difusa em relação a global ( $k_d$ ) horárias.

**Tabela 5.3** Valores dos parâmetros do modelo ajustados por modelagem inversa para os dias 21 a 24 de fevereiro de 2006

$\chi$	$\alpha_{g,vis}$	$\tau_{vis}$	$\rho_{vis}$	$\alpha_{g,IV}$	$\tau_{iv}$	$\rho_{iv}$
-0,3880	0,2468	0,0652	0,1759	0,4816	0,3436	0,6500

Cuadra (2010) encontrou para o seu experimento com a cultura de cana-de-açúcar no norte de São Paulo o valor de  $\chi$  igual a -0,2, o que melhor descrevia os dados observados, apesar de abordar que espécies de plantas C4 tem valores típicos de  $\chi$  igual a -0,5. Bonan (1996) indicou o valor generalizado de  $\chi$  igual a -0,3, tanto para gramíneas C4, quanto para culturas agrícolas, dois possíveis enquadramentos para cultura de cana-de-açúcar. O melhor ajuste de  $\chi$  encontrado por modelagem inversa foi de -0,3880 para a cultura de cana-de-açúcar na região de Alagoas.

Cuadra et al. (2012) simularam o albedo total para o solo nu para o seu experimento nos intervalos entre os cultivos e obtiveram valores em torno de 0,15. Llopart (2009) e Yanagi e Costa (2011) desenvolveram seus estudos para a Floresta Amazônica e obtiveram valores de albedo do solo no espectro do visível de 0,11 e 0,10, respectivamente. Para o espectro do infravermelho, os valores encontrados para esses trabalhos foram de 0,225 e 0,4, respectivamente.

Entretanto, Dickinson et al. (1993) ao desenvolver o *Biosphere–Atmosphere Transfer Scheme* (BATS) utilizou-se da classificação do solo por tonalidades de sua cor e seu nível de saturação para determinar o albedo do mesmo. Com isso, o albedo do solo, segundo sua classificação, varia para o espectro do visível de 0,05 para solo escuro e saturado a 0,24 para solo claro e seco. Para o espectro do infravermelho próximo, o albedo do solo varia de 0,10 para solo escuro e saturado a 0,48 para solo claro e seco. Com isso, os valores encontrados por modelagem inversa para o albedo do solo no espectro do visível e do infravermelho próximo foram de 0,2468 e 0,4816, que se aproximaram dos valores propostos por Dickinson et al. (1993) para solo claro e seco.

Llopart (2009) e Yanagi e Costa (2011) encontraram valores para  $\tau_{vis}$  de 0,032 e 0,07, respectivamente. Dorman e Sellers (1989, Tabela 2) apresentaram valores de 0,124 para a classificação da região de estudo no artigo (arbustos de folha larga com cobertura do solo, *Larrea tridentata*, *Agropyron dasystachyum*). Dickinson (1983) apresentou no artigo intervalo de valores que  $\tau_{vis}$  deveria se enquadrar em no mínimo 0,06 e no máximo 0,08, onde o valor ajustado pelo modelo, de 0,0652, está inserido.

Em relação ao  $\rho_{vis}$ , Llopart (2009) e Yanagi e Costa (2011) encontraram para a Floresta Amazônica os valores de 0,12 e 0,1, respectivamente. Dorman e Sellers (1989, Tabela 2) apresentaram valores de 0,11 e Dickinson (1983) apresenta intervalo de valores de no mínimo 0,09 a no máximo 0,12. O melhor valor ajustado no modelo para a cana-de-açúcar foi de 0,1759, acima dos valores gerais encontrados. Entretanto, valores para cultura de cana-de-açúcar para melhor comparação não foram encontrados na literatura.

No espectro do infravermelho, os valores de  $\tau_{iv}$  reportados por Llopart (2009) e Yanagi e Costa (2011) foram de 0,16 e 0,25, respectivamente. O intervalo de valores apresentado por Dickinson (1983) foi de no máximo 0,255 a no mínimo 0,24. Apesar disso, para a classificação dada por Dorman e Sellers (1989, Tabela 2), o valor encontrado foi de 0,3. Para a cultura de cana-de-açúcar, a modelagem inversa realizada retornou o valor de 0,3436 para o melhor ajuste do período avaliado.

O valor de  $\rho_{iv}$  apresentados para a Floresta Amazônica foram de 0,43 por Llopart (2009) e de 0,6 por Yanagi e Costa (2011). Dorman e Sellers (1989, Tabela 2) indicam o valor de 0,58 para esse parâmetro e, segundo o intervalo fornecido por Dickinson (1983), o valor de  $\rho_{iv}$  varia entre 0,56 e 0,595. Com isso, o valor fornecido pelo modelo para cana-de-açúcar, de 0,6500, está próximo dos encontrados na literatura.

Os valores apresentados para a Floresta Amazônica, do dossel inferior que é composto por vegetação C4, e outras coberturas do solo foram apresentados para simples comparação resguardando relações com a cultura de cana-de-açúcar.

### 5.2.2 Simulações radiação solar refletida e albedo

Os parâmetros obtidos por modelagem inversa foram testados no modelo nos dias não utilizados para a otimização (ajustes dos coeficientes) e avaliada a radiação solar refletida quanto aos índices estatísticos estabelecidos (Tabela 5.4). Considerando os dias começando às 6 h 30 min da manhã, a precisão avaliada pelo índice  $r^2$  foi próxima ao valor ideal do mesmo que é de 1. A exatidão do modelo foi inferida pelos índices  $RQME$  e  $QME$ , em que ambos apresentaram baixos erros, e pelo  $d$  que foi alto conforme o índice indica para melhor exatidão. Vale lembrar que o  $RQME$  apresenta em valores proporcionais e percentuais, e o  $QME$  apresenta no quadrado da ordem de grandeza da variável observada. Ademais, o modelo apresentou maior percentual (> 90 %) de erros não-sistemáticos, ou seja, de origens aleatórias e de difícil identificação. Essa superioridade do erro

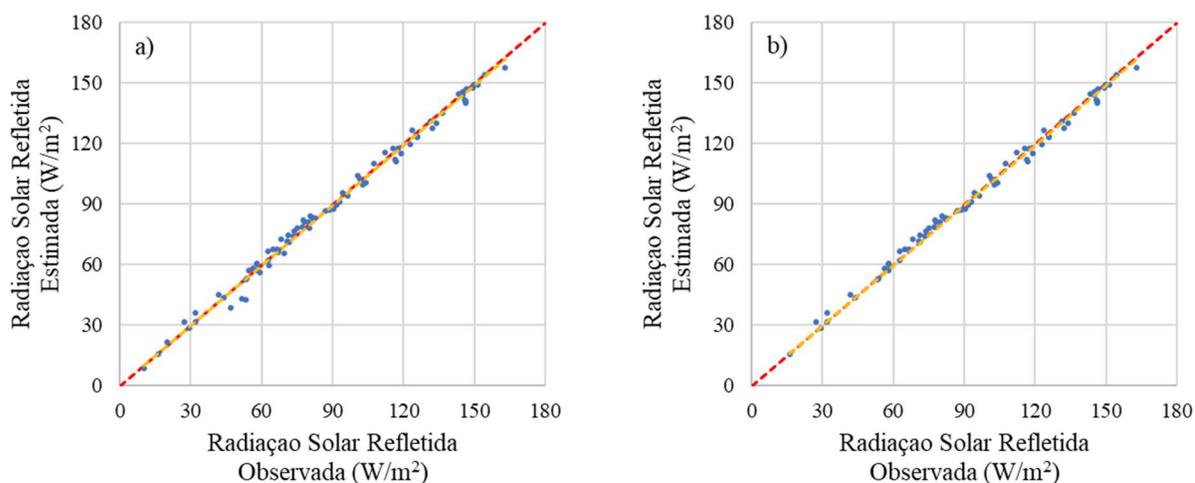
não-sistemático e em relação ao sistemático, indicou que a otimização foi eficiente em ajustar os coeficientes do modelo.

Entretanto, quando as avaliações começam às 8 h da manhã, houve aumento percentual no erro sistemático e este atinge maiores valores absolutos deste erro. Isso ocorre enquanto observou-se melhora quanto aos índices que inferem sobre a precisão e exatidão dos resultados do modelo (Tabela 5.4). Importante ressaltar que para os dias usados para teste o sol nasceu 5 h 29 min e se pôs às 17 h 46 min.

**Tabela 5.4** Índices estatísticos para avaliação do resultado de  $S^\uparrow$  estimado no topo do dossel considerando a partir de 6h 30 min e 8h da manhã.

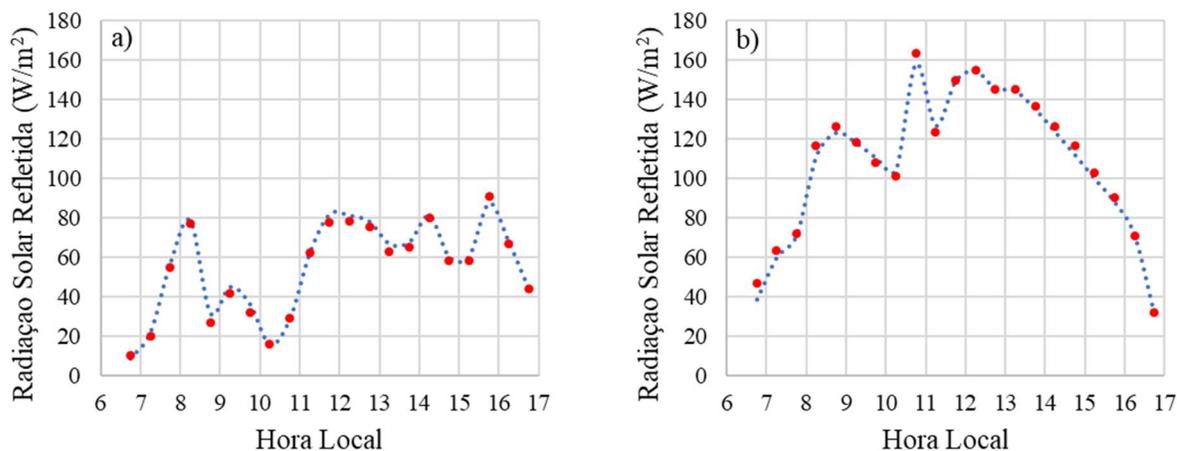
<b>Parametrização</b>	<b><math>S^\uparrow</math> estimado no topo do dossel (a partir de 6h 30)</b>	<b><math>S^\uparrow</math> estimado no topo do dossel (a partir de 8h)</b>
$r^2$	0,993	0,996
$d$	0,998	0,999
<b><math>RQME (W m^{-2})</math></b>	3,18	2,71
<b><math>RQME (\%)</math></b>	3,5 %	2,8 %
<b><math>QME</math></b>	10,10	7,37
<b><math>QMEs</math></b>	9,7 %	27,8 %
<b><math>QMEu</math></b>	90,3 %	72,2 %

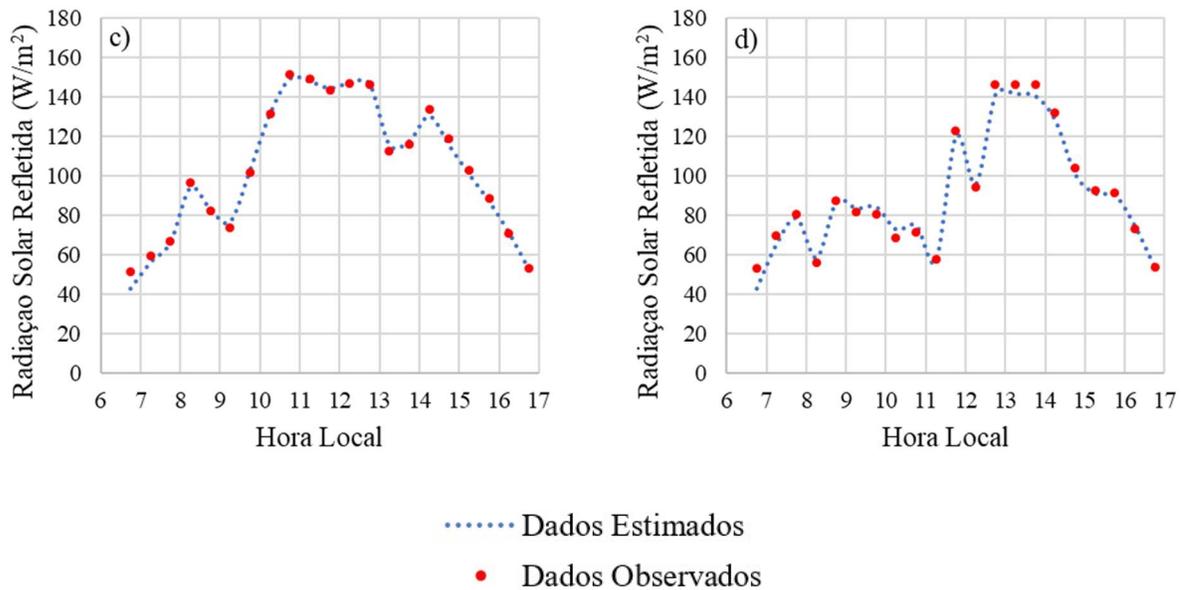
O desempenho do modelo em relação aos dados observados é avaliado também na Figura 5.9. Na média, com base no coeficiente de inclinação das regressões lineares, o modelo resultou em subestimativa da radiação solar refletida em menos de 1 %.



**Figura 5.9** Relação linear entre a radiação solar refletida observada e estimada pelo modelo a) começando às 6 h 30 min da manhã; b) começando às 8 h da manhã.

Ademais, também é observado que  $S^{\uparrow}$  estimado no topo do dossel pelas horas do dia para o período de teste (Figura 5.10) teve tendência a subestimar os valores da radiação solar refletida, principalmente nos primeiros momentos da manhã ( $< 7$  h). Essa análise corroborou com o observado da distribuição do resíduo para a análise do dia começando às 6 h 30 min (Figura 5.11), esse calculado pela radiação solar refletida observada menos a estimada, pelas horas do dia e cosseno do ângulo zenital. Vale ressaltar que Cuadra (2010) trabalhou para cultura de cana-de-açúcar com o período de 8 às 17 h, enquanto este estudo utilizou-se do período de 6 h 30 min às 17 h.

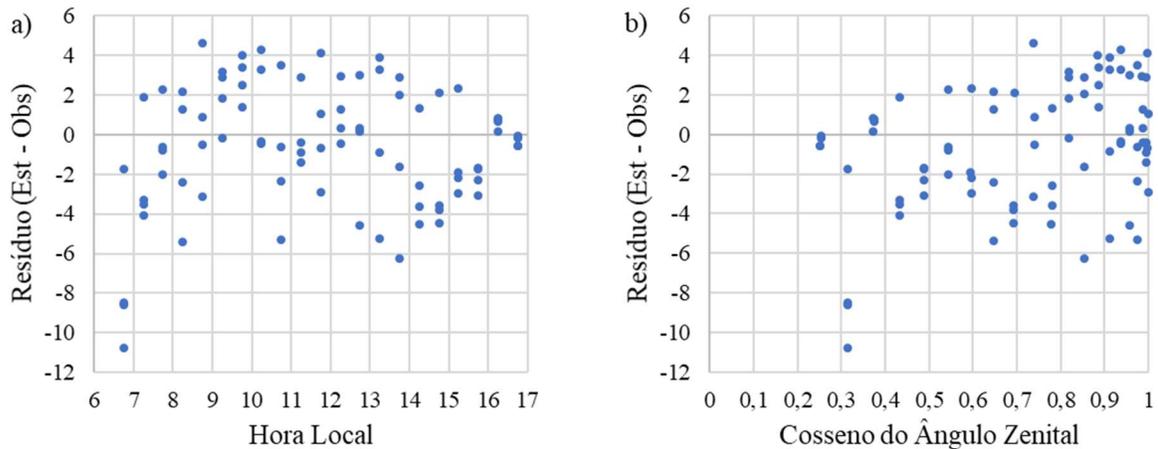




**Figura 5.10** Avaliação gráfica do desempenho do modelo quanto à  $S^{\uparrow}$  estimado no topo do dossel para cada dia usado para teste: a) 17/02/2006, b) 18/02/2006, c) 19/02/2006 e d) 20/02/2006.

Apesar de serem avaliados poucos dias, a Figura 5.11 demonstrou que os maiores erros ocorreram antes das 7 h da manhã. Esta hora o Sol ainda está baixo, com cosseno do ângulo zenital entorno de 0,3, ou seja, com ângulo zenital abaixo de  $60^{\circ}$ . Nesse caso, há quantidade menor de radiação solar incidindo a superfície, devido ao maior caminho óptico e maiores chances de espalhamento dessa radiação. Então, apesar de apresentarem maiores erros, estavam sendo tratados nesses horários menores quantidades de energia. Antes das 8 h da manhã, foram observadas cerca de 8,5 % da energia total para os dias testados. Por este motivo que muitos trabalhos começam suas avaliações a partir de 8 h da manhã, como anteriormente mencionado no caso do Cuadra (2010).

André et al. (2010) desenvolveu seu estudo com dados de um experimento em cultivo de cana-de-açúcar instalado no município de Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro. Neste caso, a cultura chegou ao Índice de Área Foliar entre 2 e 3 no dia 22 de novembro de 2005 e apresentou que o pico da radiação solar refletida ocorreu entre 10 h e 10 h 30, hora local, atingindo  $202,5 \text{ W m}^{-2}$ .



**Figura 5.11** Relação entre o resíduo ( $W m^{-2}$ ), dados observados menos os estimados, de  $S^{\uparrow}$  e: a) a hora local; b) o cosseno do ângulo zenital

O albedo calculado pelo  $S^{\uparrow}$  estimado no topo do dossel também foi avaliado quanto aos índices estatísticos (Tabela 5.5). A precisão inferida pelo  $r^2$  foi dentro de valores considerados aceitos na literatura ( $r^2 > 0,7$ ). O índice  $d$ , que informa sobre a exatidão, apresentou valor próximo de 0,9, enquanto a concordância perfeita é dada pelo valor de 1. A exatidão também foi inferida pelo  $RQME$  e  $QME$ . O primeiro índice apresentou valores de erro equivalentes baixos, por exemplo, o  $RQME$  percentual foi de 6,4 %. O segundo demonstra o erro no quadrado da grandeza da variável analisada. O albedo vai de 0 para corpos negros a 1 para corpos que refletem toda a radiação. Com isso,  $QME$  é considerado pequeno por apresentar resultados na ordem de  $10^{-4}$ . Além disso, o maior erro é identificado como sistemático por apresentar tendências.

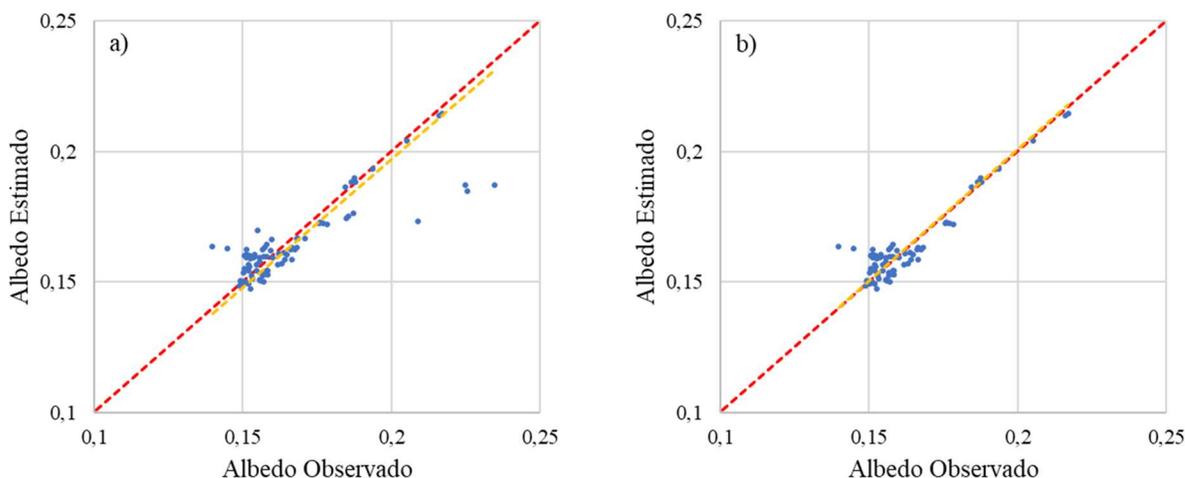
Quando feita a avaliação a partir de 8 h da manhã (Tabela 5.5), observou-se maior acurácia dos resultados estimados pelo modelo. A precisão inferida pelo índice  $r^2$  melhorou em, aproximadamente, 17 % (um ganho de precisão de 0,1236). Quanto a concordância (exatidão) das estimativas, apesar de já apresentarem bons resultados anteriormente, foi observada melhora em todos os índices avaliados:  $d$  teve aumento de mais de 0,06,  $RQME$  teve uma redução de quase 50 % ( $RQME$  diminuiu 0,0049 e  $RQME$  (%) diminuiu 2,9 %) e  $QME$  também apresentou diminuição. Ao se excluir os horários do início da manhã, observou-se mudança grande na identificação dos erros. Anteriormente, apresentou-se que 54 % dos erros eram sistemáticos e, nessa avaliação, esses erros representaram 14,2 %. Isso informa que nesse caso há participação dos erros não-sistemáticos equivalente a 85,8 %.

**Tabela 5.5** Índices estatísticos para avaliação do resultado de  $\alpha$  estimado considerando a partir de 6 h 30 min e 8 h da manhã.

Parametrização	$\alpha$ (a partir de 6h 30)	$\alpha$ (a partir de 8h)
$r^2$	0,7386	0,8622
$d$	0,8949	0,9616
$RQME$	0,0106	0,0057
$RQME$ (%)	6,4 %	3,5 %
$QME$	0,0001	< 0,0001
$QMEs$	54 %	14,2 %
$QMEu$	46 %	85,8 %

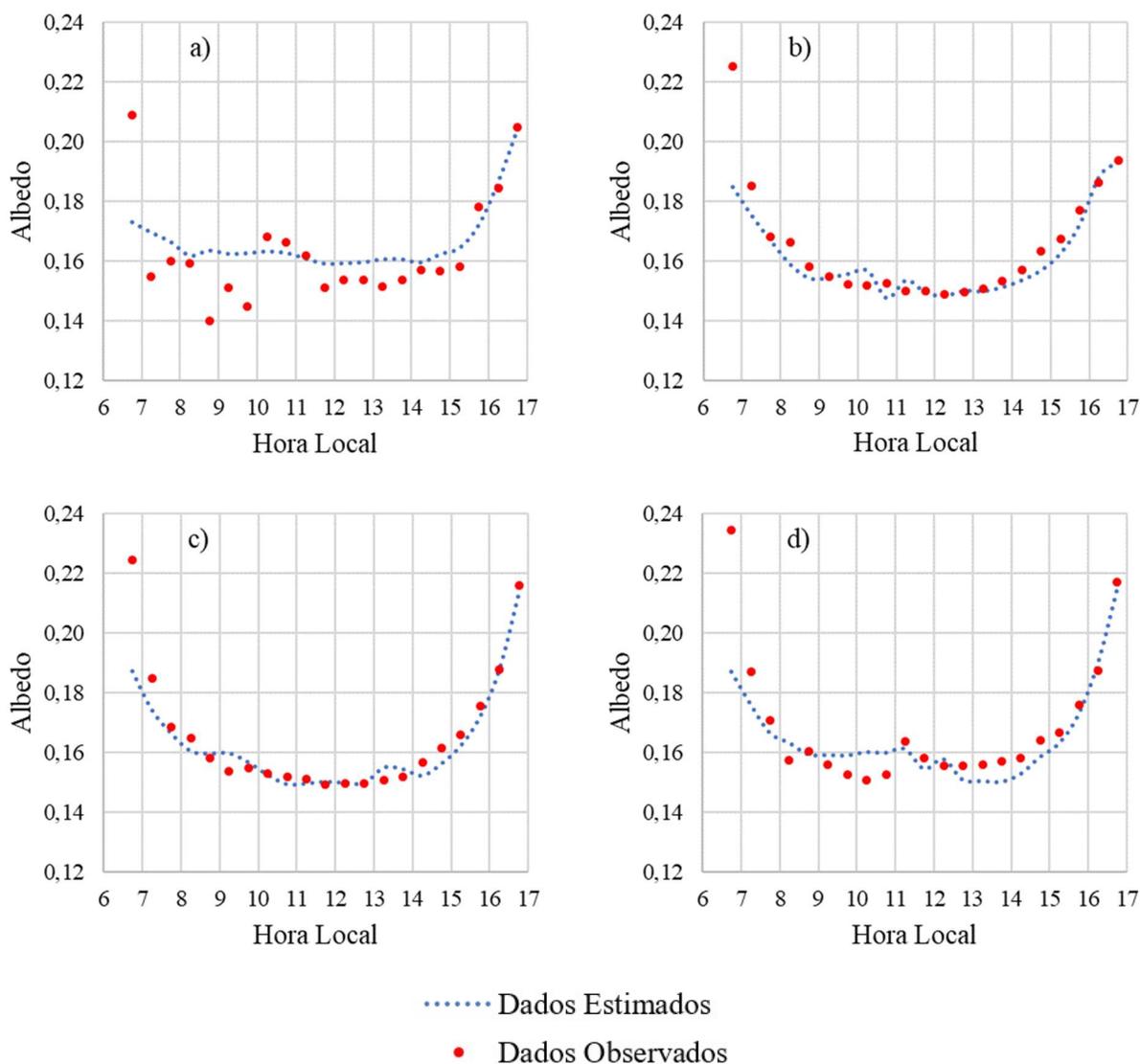
A Figura 5.12a mostra que o modelo subestimou para valores de albedo mais altos ( $> 0,16$ ) principalmente no início do dia como foi observado na Figura 5.13. Para o albedo, o modelo apresentou tendência a superestimativa para valores de albedo menores que 0,16. Na média, com base no coeficiente de inclinação das regressões lineares, o modelo resultou em subestimativa do albedo de aproximadamente 1,5 %.

Quando se fez a análise a partir de 8 h da manhã (Figura 5.12b), observou-se que os maiores erros que ocorreram quando se tem altos valores de albedo não foram mais observados, o que corroborou com a análise dos índices estatísticos (Tabela 5.5).



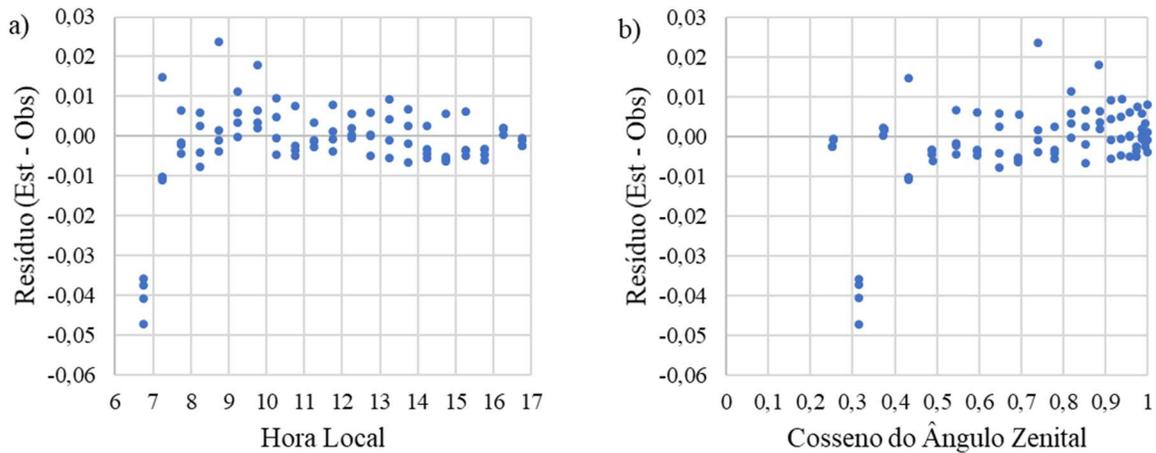
**Figura 5.12** Relação linear entre o albedo do sistema observado e estimado pelo modelo a) começando às 6 h 30 min da manhã; b) começando às 8 h da manhã.

Na Figura 5.13, observou-se a superestimativa do modelo nos menores valores de albedo nos dias 17 e 20 de fevereiro de 2006 para os dias começando às 6 h 30 min da manhã. O início do dia, quando são observados os maiores albedos, o modelo subestimou. Porém, nesses horários tem-se menor disponibilidade de energia como visto anteriormente. Entretanto, no final do dia, quando também são obtidos albedos mais altos, o modelo não teve problemas em estimar os valores.



**Figura 5.13** Variação do albedo simulado e observado ao longo do dia para cada dia usado nos testes: a) 17/02/2006, b) 18/02/2006, c) 19/02/2006 e d) 20/02/2006

A Figura 5.14, que apresentam o resíduo entre os dados observados e os estimados, corroborara com as análises feitas. Estes apresentaram que os maiores erros ocorreram no início do dia, principalmente antes das 7 h da manhã. Também se confirmou que os maiores erros ocorreram para cosseno do ângulo zenital aproximadamente de 0,3, como visto anteriormente.



**Figura 5.14** Relação entre o resíduo, dados observados menos os estimados, do albedo e: a) a hora do dia; b) o cosseno do ângulo zenital

Cuadra (2010) apresentou os valores de albedo medidos e simulados para seu experimento em cultura de cana-de-açúcar em São Paulo. No período do início do dia, entorno de 8 h da manhã, o albedo medido foi aproximadamente 0,2, assim como os simulados para  $\chi$  igual a -0,2 e -0,5. Próximo ao meio dia, o autor encontrou o valor aproximado para o albedo de 0,16, quando utilizou  $\chi$  igual a -0,2, próximo ao valor dos dados observados. Entretanto, obteve valores de albedo próximos a 0,14 quando utilizou  $\chi$  igual a -0,5. Ao final do dia, entorno de 17 h da tarde, os valores simulados com  $\chi$  igual a -0,2 e -0,5 e os valores observados para o albedo foram aproximadamente 0,21.

André et al. (2010) também apresentaram os valores encontrados para o albedo no dia observado para o IAF entre 2 e 3. Neste caso, os valores do albedo variaram entre 0,23, por volta das 13 h, cerca de 0,24 no início da manhã e 0,28 ao entardecer. O valor médio diurno do albedo para este dia foi  $0,23 \pm 0,018$ . Gomes et al. (2009) obtiveram valores de albedo para seu experimento também em cultura de cana-de-açúcar no município de Santa Rita do Passa Quatro, São Paulo, de 0,18 e 0,20 para os dias 22 de fevereiro e 16 de julho de 2005, respectivamente.

Yanagi (2006) observou dados de albedo entre 0,12 e 0,16 coletados na Reserva Biológica de Cuieiras, Floresta amazônica, entre agosto e setembro. O *RQME* para o albedo estimado pelo modelo que se utilizou de parâmetros otimizados foi de aproximadamente 0,015 e 0,030.

## 6 CONCLUSÕES

Conforme avaliação feita sobre o ajuste dos modelos de estimativa de  $k_d$ , os modelos polinomial de 3º e logístico passam no teste de normalidade de Shapiro-Wilk e se mostram significativos no teste do p-valor. Ademais, o ajuste do modelo polinomial apresenta maior  $R^2$  e menor EPE em relação ao modelo logístico, apesar de o modelo logístico também ter apresentado resultados satisfatórios.

Quanto a avaliação do teste estatístico realizado para análise de  $k_d$ , está mostra que o modelo polinomial de 3º tem desempenho melhor tanto na precisão quanto na exatidão que o outro modelo estudado.

Baseado nos testes realizados, o modelo estudado com melhor desempenho (precisão e exatidão) para separação da radiação global em suas componentes direta e difusa é o polinomial de 3º. Entretanto, no modelo de aproximação *two-stream* o modelo logístico é utilizado, visto que também apresenta desempenho similar nas análises estatísticas, contudo mostra valores fisicamente consistentes quando se extrapola para valores de  $k_t$  maiores que 0,7. Nessas condições, o modelo polinomial de 3º ajustado, retorna valores negativos, ou seja, fisicamente inconsistentes.

Dentre os testes realizados no modelo de Luss-Jaakola, o resultado dos ajustes obtido para  $S^\uparrow$  e  $\alpha$  com maior acurácia foi o relativo aos parâmetros  $\chi = -0,3880$ ,  $\alpha_{vis} = 0,2468$ ,  $\tau_{vis} = 0,0652$ ,  $\rho_{vis} = 0,1759$ ,  $\alpha_{iv} = 0,4816$ ,  $\tau_{iv} = 0,3436$ ,  $\rho_{iv} = 0,6500$ . Estes valores estão coerentes fisicamente com o encontrado na literatura.

Desta forma, os resultados dos testes realizados na estimativa da radiação solar refletida e do albedo, este calculado a partir dos valores da radiação refletida simulada, têm elevada precisão e exatidão. Entretanto, quando se realiza essas avaliações para os dias começando às 8 h da manhã, antes disso trata-se de cerca 8,5 % da radiação total diária, observa-se melhora no desempenho do modelo, principalmente em relação ao albedo. Ainda, os valores dos parâmetros encontrados por modelagem inversa ao serem confrontados com a literatura, se afirmam coerentes e consistentes.

Para futuros estudos, espera-se avaliação de modelos de separação das componentes de radiação solar global mais ampla, para minimizar os erros repassados de um modelo para o outro. Ademais, o modelo de transferência radiativa, assim como os métodos numéricos e o método de

problemas inversos, devem ser aplicados para outras épocas do ano, ou seja, utilizar-se de uma base de dados de maior representatividade para avaliar a generalização do modelo, e para outras vegetações com características semelhantes para aperfeiçoamento do mesmo e para obtenção dos parâmetros do modelo, que são complexos e onerosos quando obtidos diretamente em campo.

Vale estender a avaliação desse modelo contrapondo-o a outros métodos mais complexos como aqueles baseados na informação de satélites, por exemplo. Para, com isso, criar-se uma vasta avaliação da empregabilidade desse modelo como para quais finalidades e em quais situações.

Acima de tudo esse estudo ampliou, ainda que não concluídas as avaliações para sua generalização, as possibilidades de modelagem do balanço de radiação solar utilizando-se ainda de baixa capacidade computacional para entendimento maior do uso e ocupação do solo no Brasil de forma menos onerosa. Além de fornecer os parâmetros empíricos de uma cultura tão importante e ampla no país, já que, em 2016, os canaviais ocupavam 10,5 milhões de hectares, ou seja, 13,5% do total nacional de área plantada no país.

## REFERÊNCIAS

- A GEOGRAFIA DA CANA-DE-AÇÚCAR. Coordenação de Geografia. Rio de Janeiro: IBGE, 2017. 172p.
- ALBUQUERQUE NETO, F. L. **Modelagem Teórica e Experimental do Balanço de Energia Térmica e dos Fluxos Turbulentos e Radiativos para Estimativa da Temperatura de Superfícies Urbanas**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2016.
- ALFARO, A.Z.C. et al. **Parametrização do Albedo para Estimativa da Radiação Solar Refletida em Superfície Urbana**. XX Congresso Brasileiro de Agrometeorologia. Juazeiro, Bahia e Petrolina, Pernambuco. Ago, 2017.
- ANDRÉ, R.G.B. et al. **Aspectos energéticos do desenvolvimento da cana-de-açúcar. Parte 1: balanço de radiação e parâmetros derivados**. Revista Brasileira de Meteorologia, v.25, n.3, 375 - 382, 2010.
- BONAN, G. B. **Ecological, Hydrological, and Atmospheric Studies: Technical Description and User's Guide**. [s.l.], 1996.
- CAMPBELL, G. S.; NORMAN, J. M. **An Introduction to Environmental Biophysics**. 2. ed. Springer-Verlag New York, 1997.
- CHAPRA, S.C.; CANALE, R.P. **Métodos Numéricos para Engenharia**. 5. ed. AMGH Editora Ltda., 2011.
- COAKLEY JR., J. A.; CHÝLEK, P. **The Two-Stream Approximation in Radiative Transfer: Including the Angle of the Incident Radiation**. *Journal of the Atmospheric Sciences*. Fev., 1975.
- CUADRA, S. V. **Desenvolvimento de um modelo biofísico de crescimento da cana-de-açúcar para estudos globais**. - Tese de Doutorado. Universidade Federal de Viçosa, 2010.
- CUADRA, S. V. et al. **A biophysical model of Sugarcane growth**. *GCB Bioenergy*, [s.l.], v. 4, n° 1, p. 36–48, 2012.
- CUNHA, A. P. M. A.; ALVALÁ, R. C. S.; OLIVEIRA, G. S. **Impactos das mudanças de cobertura vegetal nos processos de superfície na região semiárida do Brasil**. *Revista Brasileira de Meteorologia*, [s.l.], v. 28, n° 2, p. 139–152, 2013a.

CUNHA, A. P. M. A. et al. **Calibration and validation of the integrated biosphere simulator (IBIS) for a brazilian semiarid region.** *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, [s.l.], v. 52, n° 12, p. 2753–2770, 2013b.

DAI, Y.; DICKINSON, R. E.; WANG, Y. P. **A two-big-leaf model for canopy temperature, photosynthesis, and stomatal conductance.** *Journal of Climate*, [s.l.], v. 17, n° 12, p. 2281–2299, 2004.

DICKINSON, R. E. et al. **Boundary Subroutine for the NCAR Global Climate Model.** [s.l.]: [s.n.], 1981.

DICKINSON, R. E. **Land Surface Processes and Climate Surface Albedos and Energy-Balance.** *Advances in Geophysics* v. 25, National Center for Atmospheric Research, p. 305–353, 1983.

DICKINSON, R. E.; HENDERSON-SELLERS, A.; KENNEDY, P. J. **Biosphere-atmosphere Transfer Scheme (BATS) Version 1e as Coupled to the NCAR Community Climate Model.** *NCAR Tech. Rep. NCAR/TN-3871STR*, 72, [s.l.], n° August, p. 77, 1993.

DICKINSON, R. E. et al. **Interactive canopies for a climate model.** *Journal of Climate*, [s.l.], v. 11, n° 11, p. 2823–2836, 1998.

DORMAN, J.L.; SELLERS, P.J. **A Global Climatology of Albedo, Roughness Length and Stomatal Resistance for Atmospheric General Circulation Models as Represented by the Simple Biosphere Model (SiB).** *Journal of Applied Meteorology*. v. 28. Set, 1989.

ECHER, M. P. S. et al. **A importância dos dados de cobertura de nuvens e sua variabilidade: Metodologias para aquisição de dados.** *Rev. Bras. Ensino Fís.*, vol.28, no.3, São Paulo, 2006.

EFTIMIE, E. **Estimation of daily global and diffuse radiation for Braşov urban area, Romania.** *International Conference on Economic Engineering and Manufacturing Systems. Recent*, v. 12, n. 3(33), Nov, 2011.

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

ESCOBEDO, J. F. et al. **Ratios of UV, PAR and NIR components to global solar radiation measured at Botucatu site in Brazil.** *Renewable Energy*. xxx. 1-10. 2010

ESCOBEDO, J.F.; SOUZA, A.P.; MARTINS, D. **An assessment of the diffuse radiation models for prediction on hourly global radiation in tilted surface.** *Nativa, Sinop*, v. 02, n. 01, p. 23-31, jan./mar. 2014

FERREIRA, F.F. **Solução Numérica de Equações de Águas Rasas**. Dissertação (Mestrado em Modelagem Computacional na Linha de Pesquisa em Matemática Aplicada e Computação Científica) - IPRJ, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2003.

FOLEY, J. A. et al. **An integrated biosphere model of land surfaces processes, terrestrial carbon balance, and vegetation dynamics**. *Global Biogeochemical Cycles*, v. 10, nº 4, pp.603-628. Dez, 1996.

FONTES, V. C. **Calibração Automática Multi-sítio e Multi-objetiva de um Modelo de Superfície Terrestre**. - Dissertação (Mestrado em Meteorologia Aplicada). Universidade Federal de Viçosa, 2015.

GOMES, H.B. et al. **Balanco de radiação em diferentes biomas no estado de São Paulo mediante imagens Landsat 5**. UNESP, Geociências, v. 28, n. 2, p. 153-164. São Paulo, 2009.

GOUDRIAAN, J. **Crop micrometeorology: a simulation study**. [s.l.]: Wageningen Centre for Agricultural Publishing and Documentation, 1977.

HADAMARD, J. **Sur les problèmes aux Dérivées Partielles et leur Signification Physique**. Princeton University Bulletin, 1902.

HALLAK, R.; PEREIRA FILHO, A.J. **Metodologia para análise de desempenho de simulações de sistemas convectivos na região metropolitana de São Paulo com o modelo ARPS: sensibilidade a variações com os esquemas de advecção e assimilação de dados**. Revista Brasileira de Meteorologia, v.26, n.4, P. 591 - 608, 2011.

IQBAL, M. **Prediction of Hourly Diffuse Solar Radiation from Measured Hourly Global Radiation on a Horizontal Surface**. Solar Energy Vol. 24, pp. 491-503. Pergamon Press Ltd., 1980.

IQBAL, M. **An Introduction to Solar Radiation**. Academic Press. The University of British Columbia, Vancouver, 1983.

ISAACSON, E.; KELLER, H.B. **Analysis of Numerical Methods**. Dover Publications, Inc., Nova Iorque, 1966.

KIUSALAAS, J. **Numerical Methods in Engineering with MATLAB®**. Cambridge University Press, 2005.

KREYSZIG, E. **Advanced Engineering Mathematics**. John Wiley and Sons, Inc. 2006.

LIU, K. N. **An Introduction to Atmospheric Radiation**. International Geophysics Series v. 84. 2. ed. 2002.

LLOPART, M. P. **Calibração do Modelo SiB2 em Módulos Sequenciais para a Floresta Tropical Amazônica**. - Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, 2009.

LUUS, R.; JAAKOLA, T.H.I. **Optimization by Direct Search and Systematic reduction of the Size of Search Region**. *AIChE Journal* v.19 No.4. p. 760-766. Julho, 1973.

MARQUES FILHO, E. P. et al. **Global, diffuse and direct solar radiation at the surface in the city of Rio de Janeiro: Observational characterization and empirical modeling**. *Renewable Energy*. v. 91, p. 64-74, 2016.

MELO, E. C. De; BRASIL JR, A. C. P. **Um Modelo multi-camadas para Atenuação de Radiação Solar em Florestas e Plantações**. II Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. João Pessoa/PB, 2002.

MGHOUCI, Y. EL et al. **Models for obtaining the daily direct, diffuse and global solar radiations**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [s.l.], v. 56, p. 87–99, 2015.

MONTEITH, J. L.; UNSWORTH, M. H. **Principles of Environmental Physics: Plants, Animals and the Atmosphere**. 4. ed. Elsevier, 2013.

NICÁCIO, R. M. **Radiação Solar Global e Difusa para a Região de Maceió-AL: Medidas e Modelos**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). Departamento de Meteorologia. Universidade Federal de Alagoas. 2002.

NOBRE, C. A. **Mudanças climáticas e o Brasil – Contextualização**. *Parcerias Estratégicas*, [s.l.], nº 27, p. 7–17, 2008.

OLIVEIRA, A. P. et al. **Diurnal evolution of solar radiation at the surface in the city São Paulo: seasonal variation and modeling**. *Theoretical and Applied Climatology*. v. 71, p. 231-249. 2002.

PAULESCU, E.; BLAGA, R. **Regression models for hourly diffuse solar radiation**. *Solar Energy*. v. 125, p. 111–124, 2016.

PEREIRA, A.; VRISMAN, A.; GALVANI, E. **Estimativa da Radiação Solar Global Diária em Função do Potencial de Energia Solar na Superfície o Solo**. *Scientia Agricola*, [s.l.], v. 59, nº 2, p. 211–216, 2002.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: Fundamentos e aplicações práticas**. Edição Revista e Ampliada. Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". Departamento de Ciências Exatas. Universidade de São Paulo. Fev, 2007.

PEREIRA, D. R. et al. **Desempenho de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para a região da Serra da Mantiqueira, MG**. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.39, n.9, p.2488-2493. Dez, 2009.

POLLARD, D.; THOMPSON, S. L. **Use of a land-surface transfer scheme (LSX) in a global climate model: the response to doubling stomatal conductance**. *Global Planet. Change*, [s.l.], v. 10, nº 1, p. 129–161, 1995.

PORFIRIO, A. C. S. et al. **An Assessment of the Global UV solar radiation under various sky conditions in Maceió-Northeastern Brazil.** *Energy*. vol. 44. p. 584-592. 2012.

RIVERA, L.D. **Comparativo entre os padrões SBTVD e o ATSC 3.0.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Telecomunicações). Universidade Federal Fluminense. Niterói, 2018.

ROSS, J. **The radiation regime and architecture of plant stands.** Dr W. Junk Publishers. The Hague-Boston-London, 1981.

SANTOS, M. A. **Balço de Radiação, Energia e Água em Cana-de-açúcar na Região dos Tabuleiros Costeiros de Alagoas.** - Universidade Federal de Alagoas, 2010.

SANTOS, M. A. et al. **Observed and modelled solar radiation components in sugarcane crop grown under tropical conditions.** *International Agrophysics*, [s.l.], v. 31, nº 2, p. 231–241, 2017.

SELLERS, P.J. et al. **A simple biosphere model (SiB) for use within General Circulation Models.** *Journal of the Atmospheric Sciences*. v. 43. n. 6. Mar, 1986.

SELLERS, P.J. et al. **A Revised Land Surface Parametrization (SiB2) for Atmospheric GCMs: part I - Model Formulation.** *Journal of Climate*. v.9. 1996.

SPITTERS, C.J.T.; TOUSSAINT, H.A.J.M.; GOUDRIAAN, J. **Separating the diffuse and direct component of global radiation and its implications for modeling canopy photosynthesis: part I. components of incoming radiation.** *Agricultural and Forest Meteorology*. v. 38, p. 217-229. 1986.

TISOT, D. A. **Modelos de Transferência Radiativa no Estudo da Concentração de Clorofila em Cana-de-açúcar Utilizando Dados Hiperespectrais.** Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2009.

TORMAN, V.B.L.; COSTER, R.; RIBOLDI, J. **Normalidade de variáveis: métodos de verificação e comparação de alguns testes não-paramétricos por simulação.** *Revista HCPA*, v. 32, n.2, p. 227-234. 2012.

VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e Climatologia.** Versão Digital 2. Recife. Mar, 2006.

WILLMOTT, C. J.. **Some Comments on the Evaluation of Models.** *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 63, p. 1309–1313, 1982.

WILLMOTT, C. J. et al. **Statistics for the Evaluation and Comparison of Model Performance.** *Journal of Geophysical Research*, [s.l.], v. 90, p. 8995–9005, 1985.

XUE, Y. et al. **A Simplified Biosphere Model for Global Climate Studies.** *American Meteorological Society*, v. 4, p. 345-364, 1991.

YANAGI, S.N.M. **Albedo de uma Floresta Tropical Amazônica: Medições de campo, Sensoriamento Remoto, Modelagem e sua Influência no Clima Regional.** Tese (Doutorado em Meteorologia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais. 2006.

YANAGI, S. N. M.; COSTA, M. H. **Modeling radiative transfer in tropical rainforest canopies: Sensitivity of simulated albedo to canopy architectural and optical parameters.** *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, [s.l.], v. 83, n° 4, p. 1231–1242, 2011.