

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

**MEDIDAS E MODELOS DE ESTIMATIVA
DA RADIAÇÃO DIRETA NA INCIDÊNCIA**

EDUARDO NARDINI GOMES

Tese apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da UNESP -
Campus de Botucatu, para obtenção do
título de Doutor em Agronomia - Área de
Concentração em Irrigação e Drenagem.

BOTUCATU - SP
Junho - 2006

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

**MEDIDAS E MODELOS DE ESTIMATIVA
DA RADIAÇÃO DIRETA NA INCIDÊNCIA**

EDUARDO NARDINI GOMES

Orientador: Professor Dr. João Francisco Escobedo

Tese apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da UNESP -
Campus de Botucatu, para obtenção do
título de Doutor em Agronomia - Área de
Concentração em Irrigação e Drenagem.

BOTUCATU - SP
Junho - 2006

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

G633m Gomes, Eduardo Nardini, 1975-
Medidas e modelos de estimativa da radiação direta na
incidência / Eduardo Nardini Gomes .- Botucatu:
[s.n.], 2006
xii, 97 f. : il. color., gráfs, tabs.

Tese (Doutorado)-Universidade Estadual Paulista, Facul-
dade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2006
Orientador: João Francisco Escobedo
Inclui bibliografia.

1. Radiação solar. 2. Modelos lineares (Estatística). 3.
Modelos não lineares (Estatística) 4. Equações. 5. Radia-
ção - Estimativas. I. Escobedo, João Francisco. II. Uni-
versidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"(Cam-
pus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônômicas. III.
Título.

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

TÍTULO: "MEDIDAS E MODELOS DE ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO DIRETA NA
INCIDÊNCIA"

ALUNO: EDUARDO NARDINI GOMES

ORIENTADOR: PROF. DR. JOÃO FRANCISCO ESCOBEDO

Aprovado pela Comissão Examinadora



PROF. DR. JOÃO FRANCISCO ESCOBEDO

PROF. DR. JOÃO CARLOS CURY SAAD

PROF. DR. FLÁVIO FERRARI ARAGON

PROF. DR. AMAIORI PEREIRA DE OLIVEIRA

PROF. DR. EMERSON GALVANI

Data da Realização: 20 de junho de 2006

Oferecimento

Ao meu pai João Roque Gomes e minha mãe Dora Maria Aparecida Nardini Gomes, que me deram todas as chances possíveis e inimagináveis no sentido de atingir essa fase de minha vida.

A meu irmão Luciano Nardini Gomes, irmão de sangue e de jornada rumo ao conhecimento.

Dedico

À Renata Coelho Sartori, minha namorada e companheira, que me apoiou em todos os momentos felizes e tristes desta caminhada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me permitir chegar até aqui.

Deixo aqui meus sinceros agradecimentos:

Ao Cientista e Professor Dr. João Francisco Escobedo, meu segundo pai, amigo e companheiro de jornada, sem o qual nada disto poderia ter se realizado.

Ao programa de Pós Graduação em Agronomia, área de concentração em Irrigação e Drenagem da FCA/UNESP, com especial atenção aos Professores: Dr. Antonio Evaldo Klar, Dr. João Carlos Cury Saad e Dr. Raimundo Leite Cruz.

À seção de Pós-Graduação, em especial à Jaqueline, Marlene e Marilena, e a Rosângela, Secretária da Pós-Graduação em Irrigação e Drenagem.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro concedido, sem os qual o referido trabalho não teria se completado.

Ao Departamento de Recursos Naturais, em especial aos Professores Dr. Dinival Martins, Dr. Alcides Lopez Leão e Dr. Isaac Stringueta Machado pela ótima convivência e apoio.

Aos amigos e colegas de pós-graduação Alexandre Dal Pai, e Glauco de Souza Rolim, pela ótima convivência e sintonia de idéias, que permitiu muitas risadas.

À Valéria de Almeida Frisina, iniciadora de minha jornada na busca do conhecimento.

Aos demais colegas de Pós-Graduação, a citar Flavio, Hildeu, Marcelo, Melânia, Milena e Raul, e de Graduação, a citar Rodrigo Angela (Bandit) e Gretta Lee Dias.

Aos estagiários do laboratório de modelagem com radiação solar, em especial: André (Leitero), Carlos (Balaio), Erick (Thunder), Felipe (Kção) por todas nossas viagens no campo das idéias, no caminho do bem.

Aos funcionários do Departamento de Recursos Naturais a citar Selma, Silvia, Cido, Beto, Eduardo, Valdomiro e Antonio.

SUMÁRIO

Página

LISTA DE TABELAS.....	VI
LISTA DE FIGURAS.....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS.....	X
RESUMO.....	1
SUMMARY.....	3
1 INTRODUÇÃO.....	6
2 REVISÃO.....	8
2.1 Radiação Solar.....	8
2.2 Medida da Radiação Solar Direta.....	10
2.3 Modelos de Estimativa.....	11
2.3.1 Modelos Estatísticos.....	11
2.3.2 Modelo Paramétrico de Linke.....	16
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	20
3.1- Clima e Instrumentação.....	20
3.2 Base de dados Horária, Diária e Mensal.....	23
3.3 Modelo Temporal diário e anual.....	24
3.4 Descrição dos Modelos de Estimativa Estatísticos.....	26
3.5 Descrição do Modelo Paramétrico.....	27
3.6 Indicativos Estatísticos.....	29
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	31
4.1 Evolução Diurna e Anual.....	31

4.1.1 Evolução diurna da radiação H_b^h anual (1996 a 2003)	31
4.1.2 Evolução diurna da radiação direta média mensal horária. $\left\langle \overline{H_b^h} \right\rangle_x$	39
4.1.3 Evolução Anual das Radiações Médias Mensais.....	49
4.2 Modelos de Estimativa.....	57
4.2.1 Modelo de Estimativa Estatístico de Liu & Jordan.....	57
4.2.1.1 Modelo Horário.....	57
4.2.1.2 Modelo Diário.....	65
4.2.1.3 Modelo Mensal.....	72
4.2.2 Modelo de Estimativa Estatístico de Angström.....	74
4.2.2.1 Modelo Diário.....	74
4.2.2.2 Modelo Mensal.....	78
4.2.3 Modelo Paramétrico de Linke.....	80
5 CONCLUSÕES.....	87
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	91

LISTA DE TABELAS

Tabela	Página
1. Diferença de energia média horária dos meses de junho e dezembro em relação à energia média horária anual	38
2. Coeficientes de regressão dos modelos de estimativa da radiação direta média mensal horária e o integrado diário no horário das 6h às 18h	42
3. Integração das evoluções diárias para $(\overline{H}_b^h)_{2002}$, $\langle H_b^h \rangle_x$ e $\langle H_b^h \rangle$	46
4. Resultados da validação da equação (15) nos meses de janeiro a dezembro	47
5. Resultados da validação das equações mensais nos meses de Janeiro a Dezembro	48
6. Coeficientes de regressão dos modelos de estimativa da fração $(\overline{K}_b^h)$ direta horária média do intervalo centesimal em função de $(K_t^h)_i$ e coeficientes de determinação	63
7. Resultados da validação das equações mensais horárias	64
8. Coeficientes de regressão dos modelos de estimativa da fração K_b^d direta diária em função de K_b^d e coeficientes de determinação	70
9. Resultados da validação das equações mensais diárias	71
10. Resultados da validação das Equações diárias (20) e (21)	77
11. Valores médios mensais de TL e respectivos desvios	83
12. Resultados da Validação do Modelo de Linke nos meses do ano de 2002	84
13. Indicativos estatísticos MBE, RMSE e d para os dias de 25/06/2002 a 29/06/2002 e 10/10/2002 a 12/10/2002	86

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
1. Pireliômetro Eppley – Detector da radiação solar direta na incidência.....	20
2. (a) Evolução anual da precipitação e número de horas de brilho solar acumulados médios anuais (35 anos); (b) Evolução anual da temperatura e umidade médias mensais de 35 anos.....	21
3. Evolução diurna da radiação direta média horária anual de 1996 a 2001 e 2003, e da curva média de 7anos	32
4. (a) Evolução diurna da radiação direta média horária de 7 anos, e seus respectivos desvios e curva polinomial ajustada; (b) Evolução diária da fração $\langle \overline{K}_b^h \rangle$ horária de 7 anos	33
5. Evolução diurna dos desvios da média de $\langle \overline{H}_b^h \rangle$ em função do tempo em horas	34
6. Evolução diurna da radiação direta média horária do ano de 2002 e estimada pela equação 15 e seus respectivos desvios	36
7. Evolução diurna da radiação direta horária média de junho e dezembro e da radiação direta horária média dos 7 anos	37
8. Evolução diária da radiação média mensal horária dos meses de Janeiro a Junho e seus respectivos desvios	40
9. Evolução diária da radiação média mensal horária dos meses de Julho a Dezembro e seus respectivos desvios	41
10. Radiação direta estimada pelas equações mensais $\langle H_b^h \rangle_{JAN}$, $\langle H_b^h \rangle_{FEV}$, $\langle H_b^h \rangle_{MAR}$, $\langle H_b^h \rangle_{ABR}$, $\langle H_b^h \rangle_{MAI}$, $\langle H_b^h \rangle_{JUN}$ e anual $\langle H_b^h \rangle$ e a Radiação direta medida no ano de 2002 $(\overline{H}_b^h)_{2002}$	44
11. Radiação direta estimada pelas equações mensais $\langle H_b^h \rangle_{JUL}$, $\langle H_b^h \rangle_{AGO}$, $\langle H_b^h \rangle_{SET}$, $\langle H_b^h \rangle_{OUT}$, $\langle H_b^h \rangle_{NOV}$, $\langle H_b^h \rangle_{DEZ}$ e anual $\langle H_b^h \rangle$ e a Radiação direta medida no ano de 2002 $(\overline{H}_b^h)_{2002}$	45

12. Evolução anual da radiação direta diária (média mensal) $(\overline{H}_b^m)_{1996}$, $(\overline{H}_b^m)_{1997}$, $(\overline{H}_b^m)_{1998}$, $(\overline{H}_b^m)_{1999}$, $(\overline{H}_b^m)_{2000}$, $(\overline{H}_b^m)_{2001}$, $(\overline{H}_b^m)_{2003}$ e também curva média mensal de 7 anos da radiação direta $\langle \overline{H}_b^m \rangle$ e seus respectivos desvios $\langle \delta \overline{H}_b^m \rangle$ em função do tempo em meses 49
13. Evolução anual radiação direta média mensal de 7 anos $\langle \overline{H}_b^m \rangle$ e seus respectivos desvios $\langle \delta \overline{H}_b^m \rangle$ e o número de horas de brilho solar $(\bar{n})$ acumulado mensal, médio de 7 anos, em função do tempo em meses 50
14. Evolução anual dos desvios da média percentuais da radiação direta entre os 7 anos.....51
15. Evolução anual da radiação direta média mensal e da precipitação acumulada média de 7 anos, em função do tempo em meses 52
16. Evolução da radiação direta média mensal com a curva polinomial ajustada e da fração média mensal dos 7 anos 53
17. Evolução da radiação direta medida (média mensal dos 7 anos) e estimada pela equação (16), e a curva polinomial ajustada.....55
18. (a) Comparação entre o numero de horas de brilho solar de 2002 com a curva média dos 7 anos; e (b) Comparação entre a precipitação de 2002 e a curva média de precipitação dos 7 anos 56
19. (a) Correlações entre valores de K_b^h e K_T^h ; (b) Curva média $(\overline{K}_b^h)$ função de intervalos discretos de $(K_T^h)_i$ 58
20. Correlações entre valores estimados K_b^h e medidos K_b^h e a reta (1:1).....60
21. Correlações entre $(K_T^h)_i$ e $(\overline{K}_b^h)$ e seus respectivos desvios $(\delta \overline{K}_b^h)$, para os meses de janeiro (fig. 21a), fevereiro (fig. 21b), março (fig. 21c), abril (fig.21d), maio (fig. 21e) e junho (fig. 21f).....61

22. Correlações entre $(K_T^h)_i$ e $(\bar{K}_b^h)$ e seus respectivos desvios $(\delta \bar{K}_b^h)$, para os meses de julho (fig.22a), agosto (fig.22b), setembro (fig.22c), outubro (fig.22d), novembro (fig.22e) e dezembro (fig.22f)	62
23. Correlação entre K_b^d e K_T^d , e curva polinomial de quarta ordem ajustada através de 2327 dias.....	65
24. Correlação entre os valores estimados e medidos de K_b^d composta por 334 dias do ano de 2002	67
25. Correlações entre K_b^d e K_t^d para os meses de janeiro a junho.....	68
26. Correlações entre K_b^d e K_t^d para os meses de julho a dezembro	69
27. Correlação entre K_b^m e K_t^m , e a reta ajustada através de regressão linear.....	72
28. Correlação entre os valores estimados e medidos de K_b^m	74
29. (a) Correlação entre a fração da radiação direta na incidência K_b^d e a razão de insolação $(n/N)^d$ diários, e (b) Correlação entre $(\bar{K}_b^d)$ em função de intervalos centesimais de $(n/N)_i^d$	79
30. (a) Correlação entre K_b^d estimado pela equação (56) e K_b^d medido; (b) Correlação entre K_b^d estimado pela equação (57) e K_b^d medido	77
31. Correlação entre K_b^m e $(n/N)^m$	78
32. Correlação entre K_b^m estimado (equação 22) e K_b^m medido.....	75
33. Frequência de Ocorrência do Fator de Turbidez de Linke	80
34. Frequência Acumulativa de Distribuição do Fator de Turbidez de Linke	81
35. Fator de Turbidez de Linke Médio Mensal em função do tempo em meses.....	82
36. Radiação Direta Medida e Estimada para os meses de (a) Julho (dias 25/06/02 a 29/06/02); (b) Outubro (dias 10/10/02 a 14/10/02)	85

LISTA DE SÍMBOLOS

ASL	Atmosferas secas e limpas.
d	Índice de ajustamento (Willmott).
E_0	Fator de correção da excentricidade da órbita da terra (u.a.).
H_O^d	Radiação no topo da atmosfera diária (MJ/m ² dia ⁻¹).
H_g^d	Radiação global na superfície horizontal diária (MJ/m ² dia ⁻¹).
H_b^d	Radiação direta na incidência diária (MJ/m ² dia ⁻¹).
H_O^h	Radiação no topo da atmosfera horária (MJ/m ² hora ⁻¹).
H_g^h	Radiação global na superfície horizontal horária (MJ/m ² hora ⁻¹).
H_b^h	Radiação direta na incidência horária (MJ/m ² hora ⁻¹).
H_O^m	Radiação no topo da atmosfera mensal (MJ/m ² mês ⁻¹).
H_G^m	Radiação global na superfície horizontal mensal (MJ/m ² mês ⁻¹).
H_b^m	Radiação direta na incidência mensal (MJ/m ² mês ⁻¹).
$(\overline{H_b^h})_i$	Radiação direta média horária (MJ/m ² hora ⁻¹) com i variando de 1996 a 2003.
$\langle \overline{H_b^h} \rangle$	Radiação direta média horária de 7 anos (MJ/m ² hora ⁻¹).
$\langle H_b^h \rangle$	Estimativa (temporal) da Radiação direta média horária de 7 anos (MJ/m ² hora ⁻¹).
$\langle \delta \overline{H_b^h} \rangle$	Desvio da média da Radiação direta média horária de 7 anos (MJ/m ² hora ⁻¹).
$\langle \overline{K_b^h} \rangle$	Transmissividade Atmosférica da radiação solar direta média horária de 7 anos (adimensional).
$\langle \overline{H_b^h} \rangle_i$	Radiação direta média mensal horária (MJ/m ² hora ⁻¹) com i variando de Janeiro a Dezembro médios de 7 anos.

$\langle H_b^h \rangle_i$	Estimativa (temporal) Radiação direta média mensal horária (para o mês i) (MJ/m ² hora ⁻¹) com i variando de Janeiro a Dezembro médios de 7 anos.
$(H_b^m)_i$	Estimativa da Radiação direta média mensal (MJ/m ² mês ⁻¹) com i variando de 1996 a 2003
$\langle \overline{H_b^m} \rangle$	Radiação direta média mensal (diária) de 7 anos (MJ/m ² mês ⁻¹).
$\langle \delta \overline{H_b^m} \rangle$	Desvio da média da Radiação direta mensal de 7 anos (MJ/m ² mês ⁻¹).
$\langle H_b^m \rangle$	Estimativa (temporal) da Radiação direta média mensal (MJ/m ² mês ⁻¹).
I_{SC}	Constante solar (1367 W/m ²).
I_O	Irradiância no topo da atmosfera (W/m ²).
I_g	Irradiância global na superfície horizontal (W/m ²).
I_b	Irradiância direta na incidência (W/m ²).
K_b	Transmissividade atmosférica da radiação direta na incidência (adimensional).
K_{DH}	Transmissividade atmosférica da radiação direta na horizontal (adimensional).
K_t^h	Índice de claridade horário (adimensional).
K_b^h	Transmissividade atmosférica da Radiação direta horária (adimensional).
K_t^d	Índice de claridade diário (adimensional).
K_b^d	Transmissividade atmosférica da Radiação direta diária (adimensional).
K_b^m	Índice de claridade horário (adimensional).
K_t^m	Transmissividade atmosférica da Radiação direta mensal (adimensional).
K_t^d	Índice de claridade diário (adimensional).
K_t^h	Índice de claridade horário (adimensional).
$\langle K_t^d \rangle$	Índice de claridade médio mensal diário (adimensional).
$\langle K_t^h \rangle$	Índice de claridade médio mensal horário (adimensional).

$(\overline{K}_t^h)_i$	Intervalo discreto de K_T^h , com i variando de 0,01 unidades (adimensional).
$(\overline{K}_b^h)$	Média da K_b^h no intervalo discreto i de $(K_T^h)_i$ (adimensional).
$(\delta \overline{K}_b^h)$	Desvio da Média $(\overline{K}_b^h)$ no intervalo discreto i de $(K_T^h)_i$ (adimensional).
$(\overline{K}_b^h)_i$	Transmissividade atmosférica da Radiação direta horária (adimensional).com i variando de Janeiro a Dezembro médios de 7 anos.
$\overline{K}_b^d$	Transmissividade da Radiação direta diária média dos 5 intervalos de K_T^d
$(\overline{K}_b^d)_i$	Transmissividade atmosférica da Radiação direta diária (adimensional) com i variando de Janeiro a Dezembro médios de 7 anos
m	Massa ótica relativa
m_a	Massa ótica a pressão real
MBE	Mean Bias Error
n	Número de horas de brilho solar (horas)
N	Fotoperíodo (horas).
$(n/N)^d$	Razão de insolação diária (adimensional).
$(n/N)^m$	Razão de insolação média mensal (adimensional).
O_i	Valores medidos
P_i	Valores estimados
p/p_0	Razão entre a pressão local a pressão padrão (ao nível do mar)
$RMSE$	Root Mean Square Error
TL	Fator de Turbidez de Linke (ASL)
Z	Ângulo zenital em graus com i variando de Janeiro a Dezembro médios de 7 anos.
δ	Declinação solar (graus).
δ_R	Espessura ótica de Rayleigh
ϕ	Latitude local (graus).
ω	Ângulo horário (radianos).

RESUMO

A radiação solar direta na incidência é uma fração da radiação solar global e possui aplicações na agronomia, biologia e na engenharia térmica. No trabalho, são descritas a evolução diurna das médias horárias e a evolução anual das médias mensais da radiação direta na incidência, no período de 1996 a 2003, em Botucatu/SP/Brasil. É apresentada ainda a proposta e a validação dos modelos estatísticos de estimativa de **Liu & Jordan e Angström**, e do modelo de estimativa paramétrico de **Linke**. A evolução diurna das médias horárias anuais gerou uma equação temporal, com elevado coeficiente de determinação ($R^2 = 0,99867$), que permite estimar a radiação direta horária anual, com precisão e exatidão (MBE=1,0%, RMSE=3,7% e d=0,9980). Em função da dependência sazonal, foi proposta a equação de estimativa diurna da média horária mensal com elevados coeficientes de determinação. A evolução anual da média mensal horária gerou uma equação temporal com coeficiente de determinação $R^2 = 0,75$, e a validação mostrou bom desempenho nos indicadores estatísticos, superestimando a medida em menos de 1%, causando espalhamento de 6,72% e índice de ajustamento de d=0,9232. Os resultados para o modelo **Liu & Jordan** mostram que: **a equação de estimativa horária**, polinomial de

quarta ordem, com $R^2 = 0,99815$, pode estimar $(\bar{K}_b^h)$ em função de K_T^h com MBE = -4,25%, RMSE = 27,60%, e o índice de ajustamento $d = 0,972$; **a equação de estimativa diária**, polinomial de quarta ordem, com $R^2 = 0,9060$, pode estimar $(\bar{K}_b^d)$ em função de K_T^d com: MBE = -3,42%, RMSE = 18,21%, e $d = 0,97$; **a equação de estimativa mensal** é linear, com elevado coeficiente de determinação $R^2 = 0,9660$, e mostra que K_b^m pode ser estimada com MBE = 3,21%; RMSE = 14,8% e $d = 0,9149$. O modelo de **Angström diário** mostra que, a correlação $K_b^d \times n/N$ não é linear: foram geradas duas equações de estimativa diária: linear e polinomial, com R^2 próximos de 1. O desempenho das equações linear e polinomial na validação é equivalente, com indicativos estatísticos: MBE = 11,5%, RMSE = 22,70% $d = 0,96$. O Modelo de **Angström mensal**, com coeficiente de determinação $R^2 = 0,9259$, subestima a medida em -8,42%(MBE), espalha em 11,35%(RMSE), e apresenta índice de ajustamento de 0,95(d). **O fator de turbidez de Linke (TL) mensal** não é constante durante o ano. Os maiores TL ocorrem nas estações do ano mais nebulosas (verão e primavera), e os menores nas de céu claro (outono e inverno). Os TL médios mensais variam entre 3,1 ($\pm 0,7$) em maio e 3,9 ($\pm 0,7$) em setembro, com média anual igual a 3,5. O modelo de Linke constituído de 12 equações mensais na validação subestimou ou superestimou (MBE) entre -1% em fevereiro e em 11,4% em outubro; espalhou entre 9% em junho e 15,6% em novembro; e o ajustamento (d) entre 0,94 em outubro e 0,77 em junho.

DIRECT SOLAR RADIATION AT THE SURFACE: MEASUREMENTS AND MODELLING. Botucatu, 2006. 97p. Tese (Doutorado em Agronomia/ Irrigação e Drenagem) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: EDUARDO NARDINI GOMES

Adviser: JOÃO FRANCISCO ESCOBEDO

SUMMARY

The direct solar radiation is a fraction of the global solar radiation and it has applications in the agronomy, biology and in the thermal engineering. This work describes the diurnal evolution of the hourly-averaged and the annual evolution of the monthly-averaged of the direct radiation in the incidence carried out from 1996 to 2003, in Botucatu/SP/Brazil. It's presented the proposal and the validation of the statistical model of **Liu & Jordan** and **Angström**, and of the parametric model of **Linke**. The diurnal evolution of the hourly values of the direct radiation provided a temporary equation, with high coefficient of determination $R^2 = 0.99867$, which allows to esteem with accuracy (MBE=1.0%, RMSE=3.7% and d=0.9980). Because of the seasonal dependence, equations to estimate diurnal evolution of the hourly monthly average values of the direct radiation were proposed, with high determination coefficients. The annual evolution of the daily monthly average values provided a temporal equation with $R^2=0.75$, and the validation showed good agreement in the statistical indicators, overestimating the measure in less than 1%, scattering in 6.72% with index of agreement of d=0.9232. **The Liu & Jordan's model to estimate the hourly values** of the direct radiation is a polynomial equation of fourth order, with the following statistical results: $R^2 = 0.99815$, MBE = -4.25%, RMSE = 27.60%, and d = 0.972; **The Liu & Jordan's model to estimate the daily values** is a polynomial equation of fourth order too, with the following statistical results: MBE = -3.42%, RMSE = 18.21%, and d = 0.97; **The Liu & Jordan's model to estimate the monthly values** is the first order ($R^2=0.9660$), with the following statistical results: MBE=3.21%; RMSE=14.8% and d=0.9149. **The Angström's model to estimate daily values** showed that the dependence is not linear between K_b and n/N . Linear and

polynomial equations were generated with R^2 near of 1. The linear and parabolic equations showed equivalent statistical results: $MBE = 11.5\%$, $RMSE = 22.70\%$ $d = 0.96$. **The Angström's model to estimate monthly values**, with $R^2=0.9259$, underestimates the measure in 8.42% (MBE), causes spread in 11.35% (RMSE), with index of agreement near $0.95(d)$. **The monthly-averaged Linke turbidity factor (TL)** it is not constant during the year. Largest TL happens in the haziest months (summer and spring), and the smallest ones in the months with clear sky (autumn and winter). The monthly average TL varies among $3.1 (\pm 0.7)$ in May and $3.9 (\pm 0.7)$ in September, with annual average equal of 3.5. The validation of the Linke's model (12 monthly equations) showed the results: (MBE) among -1% in February and 11.4% in October; it spread among 9% in June and 15.6% in November; and the adjustment (d) among 0.94 in October and 0.77 in June.

Keywords: beam, direct, estimative models, measurements, modelling, solar radiation.

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, o Brasil encontra-se em pleno desenvolvimento científico e tecnológico na busca de fontes alternativas e renováveis de energia. A radiação solar apresenta grande destaque neste contexto, principalmente na conversão da radiação solar para aplicações térmicas, fotovoltaicas, na produção biomassa e biodiesel, entre outras.

A radiação solar direta na incidência é uma fração da radiação solar global e possui aplicações em diversas áreas: 1) na engenharia térmica, relacionada com os concentradores solares, que aproveitam mais de 90% da radiação solar global que atinge a superfície terrestre na forma de radiação solar direta; 2) na fisiologia vegetal, onde a radiação fotossinteticamente ativa direta, junto com a difusa, são responsáveis por desencadear o fluxo de elétrons na fotossíntese; 3) na agronomia, onde os painéis fotovoltaicos realizam a conversão da energia radiante em energia elétrica, para utilização

em ambientes protegidos automatizados, com Microloggers promovendo o controle inteligente das taxas de irrigação, fertirrigação, ventilação e iluminação.

O conhecimento da radiação solar direta na incidência (0,285 a 4,0 μ m) se dá por meio de séries temporais, e de modelos de estimativa (estatístico ou paramétrico). As séries temporais permitem conhecer a disponibilidade energética diurna e anual da radiação solar direta em função do tempo, sem necessidade de outros instrumentos de medida. No entanto, a obtenção das séries exige que a medida da radiação seja realizada de rotina.

Já os modelos de estimativa são uma alternativa de grande importância, pois podem ser utilizados em projetos de simulação da radiação solar em outros locais de características climáticas similares.

Os modelos de estimativa estatísticos são mais simples que os paramétricos, pois a radiação ou a variável meteorológica (normalmente a radiação global ou número de horas de brilho solar), é medida de rotina em redes meteorológicas distribuída nos países que fazem previsão de tempo.

Já os modelos paramétricos necessitam de informações a respeito de diversos parâmetros atmosféricos de menor disponibilidade na rede solarimétrica mundial, como é o caso da concentração de ozônio, aerossóis, gases, etc.

O monitoramento das radiações nas Universidades é restrito à global, difusa, PAR e ondas longas (Cavalcanti, 1991; Souza et al., 2005; Tiba et al., 2005; Soares, et al., 2004; Oliveira et al., 2002a e Oliveira et al., 2002b). Escassas são as informações sobre séries temporais e equações de estimativas da radiação direta na incidência em função da global. A causa principal dessa limitação dos grupos está no custo

instrumental e de manutenção do pireliômetro e rastreador solar que é importado e caro. Os grupos de radiação solar do IAG (Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da USP de São Paulo) e da Faculdade de Engenharia Agrícola (Universidade Estadual de Cascavel do Paraná) monitoram a radiação direta na incidência, porém ainda estão na fase de formação do banco de dados.

Com esse propósito, a Estação de Radiometria Solar de Botucatu/SP/Brasil, monitora simultaneamente as radiações direta na incidência e global desde 1996. A base de dados existente, das duas radiações suficientemente longa para a geração de séries normais (acima de 30 anos), no entanto, é suficiente em função do número de horas e dias, para geração de séries temporais mais curtas (entre 5 e 10 anos), que possibilitam mostrar as tendências de evolução da radiação solar no dia e ano, bem como permitem a obtenção das equações de estimativa horária, diária e mensal. Essas partições atendem um grande número de aplicações solares nas áreas física, biológica e agrônômica.

Assim, objetivou-se no trabalho: 1) Obter a evolução diurna das radiações horárias (MJ/m^2) médias do ano e dos meses, e a evolução anual das radiações médias mensais diárias, para analisar: os níveis de energia da radiação direta anual e mensal; a fração da radiação direta em relação à global na superfície terrestre; a sazonalidade. Propor e validar as equações de estimativa temporal das evoluções diurna e anual; 2) Propor equações de estimativa horária, diária e mensal para a radiação direta, através do modelo de **Liu & Jordan**; 3) Propor equações de estimativa diária e mensal para a radiação direta, por meio do modelo de **Angström**; e finalmente, propor uma equação de estimativa para radiação direta na incidência usando o modelo paramétrico de **Linke**.

2 REVISÃO

2.1 Radiação Solar

A radiação solar é o fluxo de energia recebida pela Terra proveniente do Sol, que emite numa densidade de fluxo de $6,33 \cdot 10^7 \text{ W/m}^2$, na forma de ondas eletromagnéticas. A radiação solar é o fator de clima responsável pelos processos atmosféricos, afetando a temperatura, pressão, vento, chuva e umidade. A radiação solar é um elemento fundamental em estudos de disponibilidade energética para fins biológicos, agronômicos, ecológicos, e florestais.

Ao entrar na atmosfera, a radiação extraterrestre é em parte refletida pelas nuvens, em parte espalhada seletivamente pelas moléculas dos gases de mesmas dimensões do comprimento de onda da radiação e espalhada não seletivamente por partículas em suspensão (aerossóis) que difundem a parte da radiação incidente em todas as

direções. Outra parte é absorvida pelos gases variáveis como: vapor de água, dióxido de carbono, ozônio, etc.

A radiação solar que atinge a superfície terrestre sem sofrer interação é denominada radiação solar direta na incidência, enquanto a que atinge após sofrer o processo de espalhamento é denominada radiação difusa. A somatória das radiações direta e difusa é denominada radiação global.

A radiação solar direta na incidência, que chega na superfície terrestre, é a única componente da radiação solar que pode ser concentrada, e seu conhecimento é de extrema importância para aplicação em concentradores solares (utilizados em sistemas termo-elétricos), na geração de corrente elétrica em células solares (painéis fotovoltaicos), em aquecedores solares entre outras (Battles et al., 2000). No entanto, é necessário o conhecimento montante de energia da radiação direta que atinge a superfície de cada região a cada hora, dia e mês, por meio de bases de dados com medidas de longo prazo ou séries temporais (Jeter & Balaras, 1990).

Em função dos elevados custos dos equipamentos e de sua difícil manutenção, é limitada a cobertura de medidas da radiação direta na rede solarimétrica mundial. Rerhrhaye et al.(1995), sugerem que meios alternativos sejam desenvolvidos de forma a substituir ou complementar essas observações, quer seja por medidas indiretas, quer seja com o desenvolvimento de equações de estimativa da radiação direta na incidência.

2.2 Medida da Radiação Solar Direta

A radiação solar direta pode ser medida diretamente por meio de um pireliômetro acoplado a um rastreador solar (Rerhrhaye et al., 1995). O pireliômetro é composto de uma termopilha instalada na base de um tubo colimador, que isola a componente da luz direta na incidência normal eliminando a radiação difusa. O colimador deverá sempre estar alinhado na direção do sol.

De acordo com a Organização Meteorológica Mundial – OMM, os pireliômetros podem ser divididos em 4 grupos, quanto à precisão: padrão primário ou absoluto, padrão secundário, primeira classe e segunda classe. São exemplos de padrão primário e secundário os pireliômetros Disco de Prata Abbot e o pireliômetro de Compensação Elétrica de Angström. Os pireliômetros de primeira e segunda classe são instrumentos que geralmente utilizam termopilha como elemento sensível e são utilizados para registro contínuo da radiação solar direta. Os pireliômetros comerciais hoje considerados de primeira classe são os produzidos pela Eppley, modelo NIP (pireliômetro de incidência normal) e Kipp-Zonen, modelo NIP-CH₁. Esses instrumentos podem ser utilizados como padrões em calibrações pelo método comparativo (Coulson, 1975).

A radiação direta na incidência pode ser determinada também pelo método indireto, através das medidas das radiações global e difusa na superfície horizontal, por meio da equação:

$$I_b = (I_g - I_d) / \cos(z) \quad (1)$$

onde I_b é a radiação direta na incidência (W/m^2), I_g é a radiação global (W/m^2), I_d é a radiação difusa (W/m^2), e z é o ângulo zenital (em graus).

A radiação global normalmente é medida por um piranômetro, a difusa por um piranômetro acoplado a um anel de sombreamento. A medida da radiação difusa pelo anel de sombreamento necessita correções em função da latitude, declinação solar e das dimensões do anel (raio e largura).

2.3 Modelos de Estimativa

Para se estimar a radiação direta na incidência existem dois tipos de modelos: os modelos estatísticos (ou de decomposição) e os modelos paramétricos. Os modelos estatísticos são representados por equações matemáticas ajustadas por meio de regressão linear ou polinomial em correlações que relacionam frações radiométricas, a partir de uma base de dados medida das radiações solares direta e global, ou do número de horas de brilho solar. Já os modelos paramétricos necessitam de informações mais detalhadas das condições atmosféricas locais como: turbidez atmosférica, vapor de água, concentração de ozônio, aerossóis entre outros, sendo considerados mais complexos (Jeter & Balaras, 1990, e Olmo, 2000)

2.3.1 Modelos Estatísticos

Os modelos estatísticos podem ser de dois tipos:

- 1) Baseado em correlações entre a fração da direta na incidência (K_b) e o índice de claridade (K_t).
- 2) Baseado na correlação entre (K_b) com a razão de insolação (n/N).

As correlações do primeiro tipo seguem a metodologia inicialmente proposta por Liu & Jordan (1960), conforme mostram os trabalhos de Bartoli et al., (1982); Vignólia & McDaniels, (1986); Jeter & Balaras, (1990); Lam & Li, (1996); Battles et al., (2000); Lopez et al., (2000); Olmo et al., (1996). O modelo de Liu & Jordan vem sendo ostensivamente empregado nas estimativas da radiação direta na horizontal e difusa (Orgill & Hollands, 1977; Painter, 1981; Iqbal, 1983; Dehne, 1984; Stanhill, 1985; Skartveit & Olseth, 1987; Sirén, 1987; Soler, 1990; Battles et al., 1995; Jacovides et al., 1996; González & Calbó, 1999; Oliveira et al., 2002a). A vantagem da proposta de Liu & Jordan é eliminar a dependência da localidade.

Liu & Jordan (1960) foram os precursores da metodologia que correlaciona o índice de claridade (K_t = global/topo) com a fração direta (K_{DH} = direta na horizontal/global) e difusa (K_d = difusa/global) da radiação solar global. Os autores utilizaram dados de 98 localidades dos Estados Unidos e Canadá em sua modelagem experimental.

Outros autores como Bartoli et al., (1982); Vignólia & McDaniels (1986), Jeter & Balaras, (1990); Louche et al., (1991); Rerhrhaye et al., (1995); Lam & Li, (1996); Olmo et al., (1996), Battles et al., (2000); Lopez et al., (2000); sugeriram modelos de estimativa para a radiação direta na incidência.

Na Itália, Bartoli et al., (1982) estimaram a fração direta na incidência (K_b) da radiação solar diária, utilizando intervalos centesimais de K_t . A técnica permite uma melhor previsão do ajuste.

Na região do Mediterrâneo, na França, Louche et al., (1991) estabeleceram correlações utilizando valores horários e diários de K_b e K_t . As radiações

horárias mostraram variações consideráveis em determinados horários do dia, devido ao efeito da evaporação da água do mar. Contudo, os resultados estatísticos se mostraram satisfatórios.

No Marrocos, Rerhrhay et al., (1995), utilizando a metodologia de Liu & Jordan desenvolveram equações de estimativa de segundo grau para distribuição sazonal dos dados, enquanto que para a distribuição anual dos dados, as equações obtidas foram de terceiro grau.

Em Hong Kong, Lam & Li (1996) investigaram as características das medidas de radiação solar em termos de diferentes correlações entre a global, a direta e a difusa, e baseados nas mesmas, desenvolveram modelos de estimativa da radiação direta e difusa em função da radiação global. Com o intuito de estimarem as componentes direta e difusa horária a partir da radiação solar global, os autores dividiram K_t em três intervalos distintos: $0,15 \geq K_t$, $0,15 < K_t \leq 0,7$ e $K_t > 0,7$, representando as condições de céu nublado, parcialmente nublado e claro, respectivamente. As correlações e funções polinomiais apresentaram resultados similares, tanto na estação mais fria como no ano todo. Em resposta, valores de R^2 foram altos: 0,955, 0,989 e 0,994 para as estações quente, fria e ano inteiro, respectivamente.

Para 6 localidades de diferentes condições climáticas na Espanha (Almeria, Granada, Logroño, Murcia, Oviedo e Madrid), Battles et al., (2000) estimaram a radiação solar direta na incidência na partição horária em função de K_t , através do modelo proposto Louche et al.(1991), e também estimaram a direta a partir da difusa, utilizando os modelos propostos por diversos autores (Orgill & Hollands, 1977; Erbs et al., 1982; Skartveit & Olseth, 1987 e Reindl et al., 1990). Os melhores resultados ocorreram na

condição de baixa nebulosidade e maior elevação solar, mostrando que os modelos foram dependentes de K_t e da elevação solar.

Na Espanha, Lopez et al. (2000) determinaram a radiação direta horária através de modelos propostos por vários autores (Louche et al., 1991; Rerhrhaye et al., 1995).

Já o modelo que relaciona (K_b) com a razão de insolação (n/N), segue a metodologia inicialmente proposta por Angström (1924), sendo adaptada por diversos autores para a estimativa da radiação direta na incidência (Iqbal, 1979a; Mani & Rangarajan, 1983; Hussain, 1992; Louche et al., 1991; Rerhrhaye et al., 1995 entre outros).

Através de correlações do tipo $K_b \times n/N$, com dados de 3 estações no Canadá, Iqbal (1979a) desenvolveu equações de estimativa para a direta na incidência em função da razão de insolação média mensal diária. Os resultados com base no desvio padrão mostraram que houve elevada correlação entre as variáveis K_b e n/N .

Utilizando dados médios mensais diários da radiação global e do número de horas de brilho solar de 16 estações na Índia, Mani & Rangarajan (1983) estabeleceram correlações do tipo $K_b \times n/N$. Modelos teóricos foram propostos de forma a se estimar a radiação direta na incidência, difusa e global em função de constituintes atmosféricos como ozônio, vapor de água e turbidez atmosférica.

Na França, Louche et al., (1991) estabeleceram modelos de estimativa da radiação direta na incidência com a global, utilizando valores médios mensais diários de K_b e n/N , onde o n é número de horas de brilho solar. Os autores apontam que é mais difícil se estimar a direta na incidência do que a global através de correlações do tipo Angström, pois a direta é mais sensível à flutuação dos parâmetros meteorológicos, como

vapor de água oriundo do oceano, tendo em vista que a estação experimental está localizada em área litorânea. Os autores apontam também para a necessidade de se testarem os modelos de radiação propostos em outras localidades, utilizando bases de dados maiores, para se avaliar quais são os parâmetros que devem ser levados em consideração, na busca de uma melhora nos modelos.

Em 7 localidades no norte e centro da Índia, Hussain (1992) ajustou modelos de estimativa médios mensais diários através da correlação de K_b e K_{DH} em função de n/N . O autor afirma que K_b depende do vapor de água na atmosfera, turbidez atmosférica e massa ótica. Houve variação sazonal dos parâmetros, implicando em variação mensal de K_b , onde em junho e julho obteve-se o menor valor devido a elevada precipitação do período. Os resultados da validação dos modelos foram satisfatórios.

Na Nigéria, Maduekwe & Chendo (1995) estabeleceram correlações entre K_b e n/N nas partições diária e horária, através do modelo de Angström. Os autores ajustaram equações de primeiro e segundo graus visando a estimativa da radiação direta na incidência e estas novas correlações, em geral, melhoraram a estimativa em até 25%.

Em Marrocos, Rerhrhaye et al., (1995) desenvolveram equações de estimativa de segundo grau, ajustadas através de regressão polinomial, em correlações entre K_b e n/N para 3 períodos do ano: inverno, primavera/outono, verão, e para o ano todo. As equações sazonais apresentaram resultados superiores à equação anual (melhora no R^2 e no RMSE), com exceção à equação para o verão que apresentou desempenho ligeiramente inferior à equação anual.

2.3.2 Modelo Paramétrico de Linke

Um dos modelos paramétricos mais conhecidos para a estimativa da radiação solar direta na incidência é o modelo de Linke, que utiliza o fator de turbidez de Linke (TL), a espessura ótica de Rayleigh e a massa ótica. Esse modelo, uma vez calibrado ou parametrizado para o local, permite a estimativa por meio de informações meteorológicas e geográficas mínimas, sem a necessidade de utilizar dados de radiação solar como parâmetro do modelo.

A turbidez atmosférica é um indicador da atenuação da radiação solar direta provocada por aerossóis e absorção dos gases atmosféricos. Alguns destes componentes atmosféricos são de concentração constante, enquanto que outros, como aerossóis e vapor de água, têm sua concentração variável dependendo da localidade e da época do ano. Um dos fatores de turbidez mais conhecido é o fator de turbidez proposto por Linke. Segundo Pedrós et al. (1999) e Hussain et al. (2000), o fator de turbidez de Linke (TL) representa o número de atmosferas secas e limpas (ASL) que são necessárias para produzir na radiação extraterrestre uma atenuação equivalente à atenuação de uma atmosfera real.

Segundo Molineaux & Ineichen (1996), os aerossóis e o vapor de água são os principais atenuantes da radiação solar direta, e teoricamente seus efeitos atenuantes não podem ser considerados independentes. Contudo, Robinson (1966) mostra que é possível determinar separadamente a contribuição que os aerossóis e o vapor de água apresentam na atenuação da radiação direta, utilizando-se do filtro Schott Red RG-2, já que os aerossóis e o vapor de água atuam em distintas bandas espectrais (visível e infravermelho, respectivamente).

Existem diversas parametrizações para o cálculo de TL, sendo uma das mais simples a proposta por Kasten (1996), que leva em conta a espessura ótica de Rayleigh calculada em função da massa ótica.

Segundo Hussain et al. (2000), o fator TL apresenta variação sazonal, onde a variação da turbidez nas estações mais secas do ano pode estar relacionada com mudanças na concentração de aerossol na baixa atmosfera, ocasionadas por ventos de superfície, e transporte de poeira para altos níveis da atmosfera por meio dos processos de convecção e turbulência. Já nos períodos mais nebulosos (úmidos), em que os aerossóis são retirados da atmosfera com as chuvas, o vapor de água passa a ser mais presente, atenuando a radiação solar direta na fração espectral do infravermelho.

Vários autores determinaram TL para diversas localidades, dentre eles podemos destacar: Pedrós et al. (1999) determinaram o fator de Turbidez de Linke para Valência, Espanha, onde constataram que no período da manhã a turbidez mostra mais elevada do que no período da tarde. Os resultados mostraram ainda que a turbidez é menor no inverno (aproximadamente 3,0) do que no verão, onde atinge o máximo.

Hussain et al. (2000) calcularam a turbidez de Linke para Dhaka, Haripur e Sripur em Bangladesh, sendo Dhaka uma cidade industrial, enquanto que as demais cidades são tipicamente rurais. Os autores afirmam que ocorreu um aumento do TL no verão, devido aos ventos de superfície e transporte de poeira por convecção e turbulência para altos níveis na atmosfera, fazendo com que na cidade mais industrializada o TL oscilou entre $3,46 \pm 0,35$ no outono, a $4,83 \pm 0,26$ em março, enquanto que nas regiões rurais o TL foi de $0,40 \pm 0,3$.

Shaltout et al. (2001) calcularam o fator de turbidez de Linke em El- Menia, região poluída localizada no Egito, e encontraram valores entre 2,01 e 5,86 ASL.

Os máximos valores de TL ocorreram nos meses do verão devido a aerossóis e poluição, enquanto que os mínimos valores ocorreram no inverno, devido a maior limpeza da atmosfera pelo aprisionamento dos aerossóis nas gotas que coalesceram.

Li & Lam (2002) realizaram um estudo sobre a turbidez atmosférica de Hong Kong utilizando a metodologia de Linke, e afirmam que a condição de céu de Hong Kong pode ser considerada entre túrbida e clara, pois em 50% dos dias de céu limpo em análise, TL situou-se entre 4,3 a 5,3 ASL.

Diabaté et al. (2003) determinaram TL para 16 localidades na África, e constataram que $TL=3,5$ é constante ao longo do ano nas proximidades do Mediterrâneo, enquanto que as estações localizadas no sudoeste tropical exibiram ampla variação de TL.

Chaâbane et al. (2004) calcularam TL na costa norte da Tunísia. Os autores afirmam que ocorreram variações diárias e mensais em TL. Segundo os autores, as fontes prováveis para o aumento de TL no período da tarde são as massas de ar marítimas que trazem o vapor de água do oceano para o continente, enquanto que o aumento de TL no período da manhã se deve a poluição carregada pelas massas de ar continentais no sentido continente-oceano.

Uma importante aplicação do TL está relacionada com a estimativa da radiação direta na incidência (W/m^2), utilizando informações mínimas (ângulo zenital, massa ótica e espessura ótica de Rayleigh) que independem de medidas experimentais da radiação solar, e do TL (calculado ou estimado) para localidade.

Neste sentido, Becker (2001) desenvolveu algoritmos utilizando o modelo de Linke para calcular a radiação direta e difusa em 5 localidades de Israel, encontrando bons resultados especialmente na condição de céu claro. Contudo, o autor aponta para a necessidade de desenvolvimento de um único modelo que contemple toda Israel.

A literatura mostrou que o TL depende das condições atmosféricas relacionadas com concentração de aerossóis e vapor de água. Portanto, a geração do modelo de Linke (equação de estimativa) depende inicialmente da obtenção do TL local, também conhecido como calibração do modelo. Com as medidas de I_{sc} e I_b , o cálculo da espessura ótica de Rayleigh, e da massa ótica, determina-se TL antecipadamente.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Clima e Instrumentação

A Estação de Radiometria Solar, mostrada na Figura 1, está inserida em ambiente rural na Faculdade de Ciências Agrônômicas (FCA) da Universidade Estadual Paulista (UNESP) em Botucatu (latitude 22,85°S, longitude 48,45°W e altitude 786m), e desde 1995 monitora de forma contínua a radiação solar global e direta na incidência.



Figura 1. Pireliômetro Eppley – Detector da radiação solar direta na incidência

O clima local é classificado como Cwa (critérios de KÖPPEN), temperado quente (mesotérmico), o verão é quente e úmido e o inverno é seco. O dia mais longo (solstício de verão) tem 13,4 horas em dezembro, e o mais curto (solstício de inverno) tem 10,6 horas em junho. Os meses de maior e menor número de horas de brilho solar ocorrem em agosto e fevereiro com totais médios de 161,56h e 115,28h, respectivamente. A maior precipitação ocorre no mês de janeiro com total médio de 260,7mm e a mínima em agosto com 38,2mm. Os meses de fevereiro e julho são o mais quente e o mais frio do ano, respectivamente, com temperaturas médias de 23,2°C e 17,1°C, enquanto que fevereiro e agosto são os meses que apresentaram a maior e menor umidade relativa do ar, respectivamente, com percentuais médios de 78,2% e 61,80%, respectivamente. A Figura 2 mostra as séries normais da precipitação, número de horas de brilho solar, temperatura e umidade do posto meteorológico.

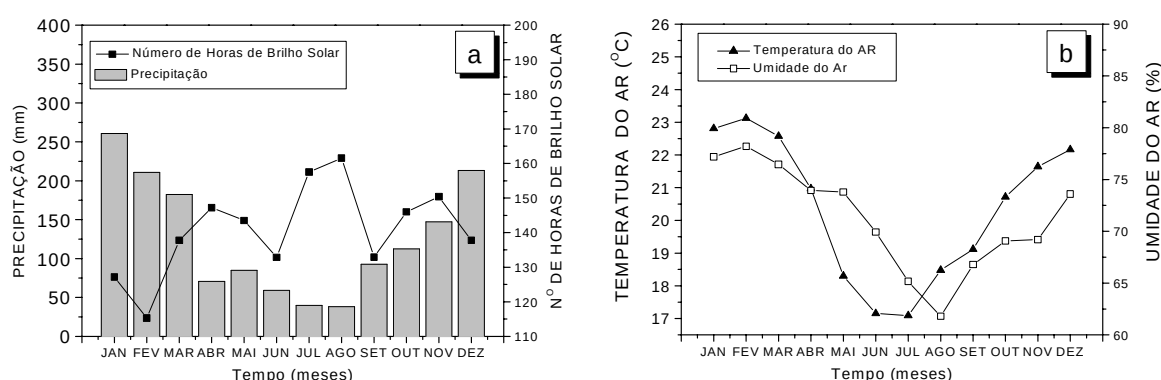


Figura 2. (a) Evolução anual da precipitação e número de horas de brilho solar acumulados médios anuais (35 anos); (b) Evolução anual da temperatura e umidade médias mensais de 35 anos.

A base de dados das radiações solares direta na incidência e global utilizada neste estudo compreende os anos de 1996 a 2003. A irradiância global (I_g) é

monitorada por um piranômetro Eppley PSP enquanto a direta na incidência (I_b) por um pireliômetro Eppley NIP, acoplado a um rastreador solar ST3 da Eppley. As características operacionais referentes a fator de calibração, intervalo espectral, tempo de resposta, linearidade, resposta ao cosseno e a temperatura dos detectores da radiação global e direta estão apresentados no quadro abaixo:

Quadro 1. Características operacionais referentes a fator de calibração, intervalo espectral, tempo de resposta, linearidade, resposta ao cosseno e a temperatura dos detectores da radiação direta e global.

Radiação	Direta	Global
Sensor - Marca	Pireliômetro - Eppley	Piranômetro - Eppley
Fator de Calibração	$7,59\mu\text{V/Wm}^{-2}$	$7,45\mu\text{V/Wm}^{-2}$
Range Espectral	295-2800nm	295-2800nm
Tempo de resposta	1s	1s
Linearidade	$\pm 0,5\%$ (0 a 1400 W/m^2)	$\pm 0,5\%$ (de 0 a 2800 W/m^2)
Cosseno	--	$\pm 1\%$ ($0 < Z < 70^\circ$) $\pm 3\%$ ($70^\circ \leq Z < 80^\circ$)
Resposta à temperatura	$\pm 1\%$ de -20°C a 40°C	$\pm 1\%$ de -20°C a 40°C

Para aquisição dos dados foi utilizado um Datalogger da Campbell CR23X operando na frequência de 1 Hz, armazenando médias instantâneas de 5 minutos (médias de 300 leituras instantâneas). Os dados armazenados diariamente no módulo de memória SM192 da Campbell são transferidos para um microcomputador utilizando-se uma interface SC532 e o software PC208w da Campbell. Inicialmente, os dados passam por um controle de qualidade onde são eliminando-se os valores espúrios, que causam ausência de correlação. Numa segunda etapa, os dados são processados por programas desenvolvidos especificamente para o cálculo das radiações horárias, diárias e mensais.

3.2 Base de dados Horária, Diária e Mensal

As radiações, em MJ/m², foram calculadas a partir das integrações horária, diária e mensal das irradiâncias global I_g , direta na incidência I_b , e no topo da atmosfera I_o , em W/m² (médias de 5 minutos), determinando-se as radiações horárias: H_g^h , H_b^h e H_o^h ; diárias: H_g^d , H_b^d e H_o^d ; e mensais: H_g^m , H_b^m e H_o^m , onde o símbolo H representa energia integrada no intervalo de tempo horário h , diário d e mensal m , e os símbolos g , b , e o representam as radiações global, direta na incidência e no topo da atmosfera. Como exemplo, as integrações horária, diária e mensal para a radiação direta na incidência estão representadas por:

Horária: $H_b^h = \int_{t_n}^{t_{n+1h}} I_b(t) dt$, onde: $t_n = n\Delta t$, $n = \text{inteiro}$.

Diária: $H_b^d = \int_{t_{ns}}^{t_{ps}} I_b(t) dt$, onde: t_{ns} é a hora do nascer do sol, t_{ps} é a hora do pôr-do-sol.

Mensal: $H_b^m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{Nm} H_b^{di}$, onde: $Nm = \text{número de dias do mês } m$.

A irradiância no topo da atmosfera (I_o) foi calculada instantaneamente conforme Iqbal (1983) através da equação:

$$I_o = I_{sc} E_o (\sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega) \quad (2)$$

onde I_{sc} representa a constante solar equivalente a 1367 W/m^2 , E_0 é o fator de correção da excentricidade da órbita da terra, δ é a declinação solar; ϕ é a latitude local e ω é o ângulo horário.

As radiações dos anos de 1996 a 2001 e 2003 foram utilizadas na geração das equações de estimativas, e o ano de 2002 na validação. Ressalta-se que o critério de escolha para a geração dos modelos e da validação foi sorteio realizado antes de qualquer análise prévia dos dados. Posteriormente, foram eliminados os dias em que ocorreram paralisações devido a problemas elétricos de pelo menos um dos radiômetros que mediam as radiações direta e global.

3.3 Modelo Temporal diário e anual

Os modelos temporais diário e anual são baseados nas evoluções das médias horárias do ano ou do mês, enquanto o modelo temporal anual, na evolução das médias mensais diárias. Para se determinar a evolução diurna da radiação direta calcularam-se as médias anuais das energias de cada hora, por:

$$(H_b^h)_Y = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N H_b^h \quad (3)$$

onde $(H_b^h)_Y$ é a média anual (do ano y) da radiação direta H_b da hora h , e N é o número de observações horárias que a radiação direta apresentou no ano y .

A partir das energias médias, determinaram-se as médias horárias de sete anos das radiações direta na incidência através da expressão:

$$\langle H_b^h \rangle = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (H_b^h)_{1995+n} \quad (4)$$

onde $\langle H_b^h \rangle$ é a média de 7 anos da radiação direta da hora (h), e N é o número de anos.

Na evolução anual da radiação direta calcularam-se as médias mensais das energias integradas de cada dia, por:

$$(H_b^m)_y = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N H_b^d \quad (5)$$

onde $(H_b^m)_y$ é a média mensal da radiação direta diária H_b^d (do mês m no ano y) e N é o número de dias do mês m no ano y .

A partir das energias médias, determinaram-se as médias mensais de 7 anos da radiação direta na incidência (diária) através da expressão:

$$\langle H_b^m \rangle = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (H_b^d)_{1995+n} \quad (6)$$

onde $\langle H_b^m \rangle$ é a média mensal m de 7 anos da radiação direta diária, e N é o número de anos.

A partir das médias horárias (evolução diurna) do ano ou do mês, e das médias mensais (diárias) (evolução anual), dos 7 anos da radiação direta na incidência, elaboraram-se os gráficos por meio do programa ORIGIN 6.0, determinando-se as equações diurna e anual da radiação direta na incidência média de 7 anos, em função do tempo (em horas e meses).

3.4 Descrição dos Modelos de Estimativa Estatísticos

O modelo de Liu & Jordan estabelece correlações entre o índice de claridade K_t (transmissividade atmosférica da radiação global) com a fração direta na incidência K_b .

Estas frações estão representadas pelas relações: $K_t^x = H_g^x / H_o^x$, $K_b^x = H_b^x / H_{sc}^x$, onde x assume as partições (horária h e diária d), H_g^x é a radiação global, H_o^x é a radiação no topo da atmosfera, H_b^x é a radiação direta na incidência e H_{sc}^x é a constante solar integrada no topo da atmosfera. Na partição mensal, para obter K_b^m e K_t^m utilizaram-se das médias mensais de K_b^d e K_t^d . As equações de estimativa foram ajustadas por regressão polinomial entre as correlações K_b^x e K_t^x , nas partições horária h , diária d e mensal m .

No modelo de Angström, a fração direta diária K_b^d foi relacionada com a razão de insolação diária $r = n/N$, onde n representa o número de horas de brilho

solar e N o fotoperíodo local diário. Na partição mensal, relacionou-se $(n/N)^m$ e K_b^m obtidos por meio das médias mensais de $(n/N)^d$ e K_b^d .

3.5 Descrição do Modelo Paramétrico

No modelo de Linke, o fator de turbidez de Linke (TL) foi determinado a partir da expressão proposta por Li & Lam (2002) :

$$TL = \ln(I_{SC}E_0/I_b)/(\delta_R m_a) \quad (7)$$

onde: I_{SC} é a constante solar no topo da atmosfera, igual a 1367 W/m^2 ; E_0 é a excentricidade da Terra, m_a é massa ótica a pressão real, δ_R é a espessura ótica de Rayleigh, e I_b é a irradiância direta na incidência. O fator de turbidez de Linke (TL) é um indicativo do número de atmosferas secas e limpas necessárias para promover a atenuação da radiação direta em relação a uma atmosfera real, ou seja, é um indicador da atenuação da radiação solar pelos constituintes atmosféricos: moléculas de ar, vapor de água e aerossóis, sendo assim, um importante parâmetro de predição da disponibilidade da radiação solar em dias sem nuvens.

A massa ótica a pressão real (m_a) foi calculada pela expressão:

$$m_a = m_r(p/p_0) \quad (8)$$

onde m é massa ótica relativa:

$$m = \left[\cos Z + 0,15(93,885 - Z)^{-1,253} \right]^{-1} \quad (9)$$

onde Z é o ângulo zenital em graus.

A relação p/p_0 é a razão entre a pressão local a pressão padrão (ao nível do mar), e foi calculada em função da altitude (h) em metros (Iqbal, 1983) pela expressão:

$$p/p_0 = \exp(-0,0001184h) \quad (10)$$

A espessura ótica de Rayleigh (δ_R), foi calculada através da massa ótica relativa, sendo representada por:

$$\delta_R = (6,6296 + 1,7513m - 0,1202m^2 + 0,0065m^3 - 0,00013m^4)^{-1} \quad (11)$$

Na depuração dos dados foi adotado o critério de corte para céu aberto proposto por Karayel (1984), onde a irradiância direta na incidência deve ser maior que 200W/m^2 , e a razão entre a irradiância difusa pela global menor que $1/3$.

3.6 Indicativos Estatísticos

Os indicadores estatísticos *MBE* (Mean Bias Error), *RMSE* (Root Mean Square Error), e “d” de Willmott utilizados na avaliação da performance das equações de estimativa foram:

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)}{N} \quad (12)$$

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{N} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P'_i| + |O'_i|)^2} \quad (14)$$

Onde: P_i representa os valores estimados, O_i os valores medidos, N o número de observações, $|P'_i|$ o valor absoluto da diferença $P_i - \overline{O_i}$, onde $\overline{O_i}$ representa a média de O_i , e $|O'_i|$ representa o valor absoluto da diferença $O_i - \overline{O_i}$.

O indicativo *MBE* representa a média dos desvios e provê informações quanto à performance do modelo. Os Valores negativos de *MBE* indicam subestimativa do modelo testado, e vice-versa. Segundo Stone (1993), quanto menor o valor absoluto de *MBE*, melhor é a performance do modelo testado. A desvantagem deste método é que uma superestimativa cancela uma subestimativa.

O *RMSE* é a raiz quadrada do erro quadrático médio e informa sobre o valor real do erro produzido pelo modelo. As desvantagens do *RMSE* são que alguns erros de grande proporção na soma podem causar acréscimos significativos nos valores de *RMSE*, além do que ele não diferencia superestimativa de subestimativa. Em geral, quanto menores os valores obtidos para *RMSE*, melhor a performance dos modelos.

O índice de ajustamento “d”, variando de 0 a 1, representa o total desajustamento ou ajustamento, respectivamente, entre a estimativa e a medida (Willmott 1981). A vantagem do indicativo “d” é que descreve as variações proporcionais de duas variáveis, fazendo distinção entre tipo e magnitude de possíveis covariâncias, diferentemente do índice de correlação (R) e do coeficiente de determinação (R^2) que não fazem distinção.

A utilização conjunta dos indicativos estatísticos *MBE*, *RMSE* e índice de ajustamento “d”, é a alternativa adequada para validação de modelos estatísticos, pois permite análise simultânea do desvio da média, identificando a ocorrência de sub ou superestimativa, espalhamento e ajustamento do modelo em relação às medidas. Alados et al. (2000) utilizaram o índice “d” conjuntamente com o *RMSE* no teste de validação de seus modelos de radiação solar.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Evolução Diurna e Anual

4.1.1 Evolução diurna da radiação H_b^h anual (1996 a 2003)

A Figura 3 mostra a evolução diurna da radiação direta horária média para os anos de 1996, 1997, 1998, 1999, 2000, 2001 e 2003, na superfície terrestre, em função do tempo em horas e a evolução diurna média dos 7 anos. Em cada intervalo horário h , o símbolo $(\overline{H}_b^h)_X$ representa a média da radiação H direta b no ano X , enquanto que o símbolo $\langle \overline{H}_b^h \rangle$ representa a média horária da radiação H direta b em 7 anos. O desvio da média da $\langle \overline{H}_b^h \rangle$ é representado pelo símbolo $\langle \delta \overline{H}_b^h \rangle$.

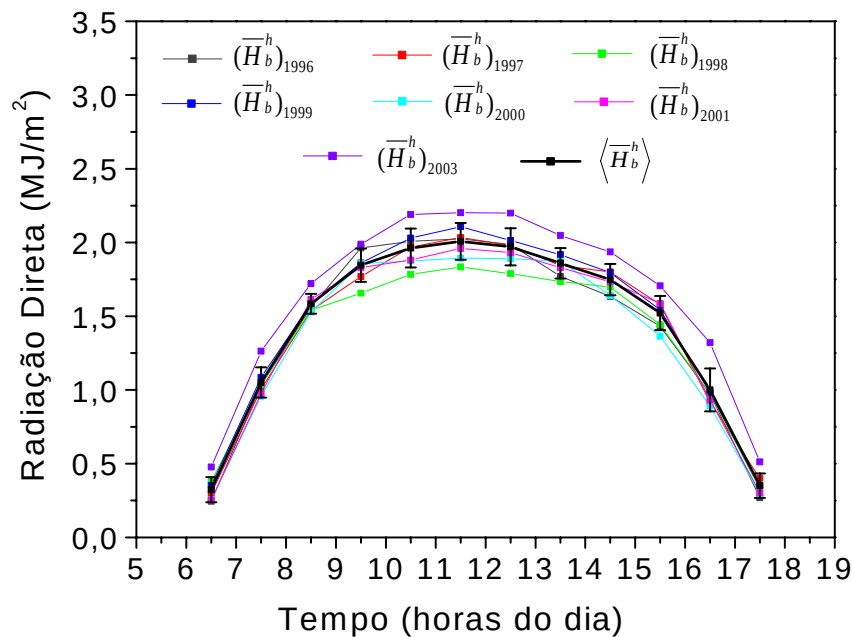


Figura 3. Evolução diurna da radiação direta média horária anual de 1996 a 2001 e 2003, e da curva média de 7 anos.

As evoluções diurnas para cada ano apresentam variações nos níveis de energia em função da variabilidade climática local, relacionada à nebulosidade, concentrações de vapor de água e aerossóis, durante o dia e ano.

A integração diária das evoluções anuais de 1996 a 2001, e 2003 (da figura 3) resulta em: $16,64\text{MJ/m}^2$, $16,78\text{MJ/m}^2$, $15,85\text{MJ/m}^2$, $17,27\text{MJ/m}^2$, $16,04\text{MJ/m}^2$, $16,55\text{MJ/m}^2$ e $19,06\text{MJ/m}^2$, respectivamente, enquanto que a integração da radiação direta média horária de 7 anos resulta em $16,89\text{MJ/m}^2$. Os anos de 1999 e 2003 são mais energéticos que $\langle \overline{H}_b^h \rangle$ em 2,25% e 12,85%, respectivamente, enquanto que os anos de 1996, 1997, 1998, 2000 e 2001 são 1,48%, 0,65%, 6,16%, 5,03% e 2,01% menos energéticos que $\langle \overline{H}_b^h \rangle$.

A Figura 4 mostra a evolução diurna da radiação direta média horária $\langle \overline{H}_b^h \rangle$ e seus desvios $\langle \delta H_b^h \rangle$ para cada intervalo de tempo em horas e da fração direta média de 7 anos $\langle \overline{K}_b^h \rangle$.

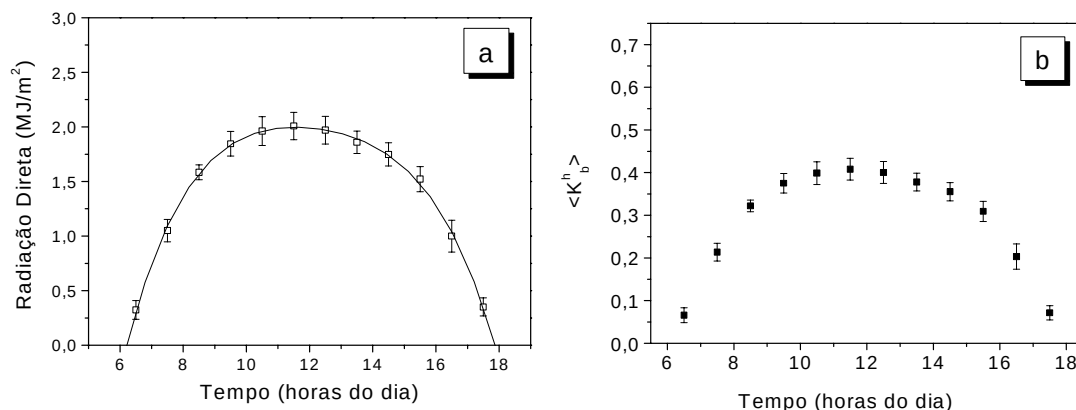


Figura 4. (a) Evolução diurna da radiação direta média horária de 7 anos, e seus respectivos desvios e curva polinomial ajustada; (b) Evolução diária da fração $\langle \overline{K}_b^h \rangle$ horária de 7 anos.

A evolução diurna de $\langle \overline{H}_b^h \rangle$ apresenta uma quase simetria meridional do nascer do sol até o meio dia, e do meio dia até o pôr-do-sol. No período da tarde, as energias médias horárias são menores que as da manhã, e isto se deve à absorção da radiação direta devido ao aumento da nebulosidade durante o dia, a qual vai se acumulando no período da tarde. A evolução diária começa às 6h30 com 0,32MJ/m², cresce até às 12h, atingindo o máximo de aproximadamente 2,0MJ/m², decrescendo a seguir, até o nível de 0,35MJ/m², às 17h30.

A evolução da fração $\langle \overline{K}_b^h \rangle$ segue a mesma tendência da evolução da radiação $\langle \overline{H}_b^h \rangle$, mesmo porque a fração é proveniente da radiação por meio da divisão

da radiação direta na incidência pela constante solar horária: $4,921\text{MJ/m}^2$ (Iqbal, 1983). A evolução da fração $\langle \overline{K}_b^h \rangle$ inicia-se com 7,0% no horário da 6h30, crescendo nos intervalos seguintes até atingir o máximo às 12h, com percentual de 41,0%, decrescendo sucessivamente até atingir novamente 7,0% às 17h30. A variação da fração $\langle \overline{K}_b^h \rangle$ deve-se a maior concentração de vapor de água no sentido de aumento da massa ótica.

A Figura 5 mostra os desvios percentuais de $\langle \overline{H}_b^h \rangle$ em função do tempo em horas. Os desvios são mais elevados no início e final do dia, sendo superiores a 23%, e decrescem gradualmente até o meio do dia, onde atingem cerca de 6%. Dois fatores são responsáveis pela elevação dos desvios. O primeiro é relacionado ao fotoperíodo local, pois em determinados dias do inverno alguns valores muito baixos (ou nulos) de radiação direta são contabilizados no cálculo de $(H_b^h)_x$ (onde x assume os anos de 1996 a 2001, e 2003), implicando assim na elevação dos desvios.

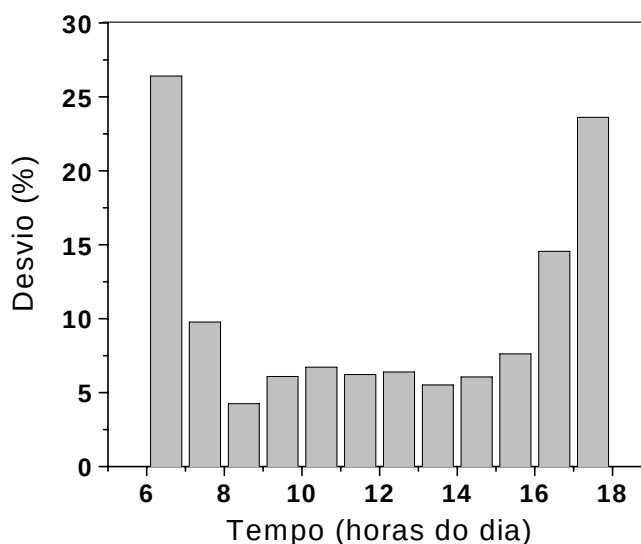


Figura 5. Evolução diurna dos desvios da média de $\langle \overline{H}_b^h \rangle$ em função do tempo em horas.

O segundo fator está relacionado com a localização da estação experimental, onde o campo de visão dos equipamentos de medida da radiação solar não é simétrico na trajetória leste-oeste. A oeste o ângulo de visão é menor que a leste, devido à inclinação do terreno e da presença de floresta no plano do horizonte.

Para o horário das 7h30 às 17h30, o desvio médio é da ordem de 8,8%, demonstrando que a variação da radiação direta média horária é relativamente estável entre os anos.

A função polinomial de quarto grau foi a que melhor se ajustou à evolução média anual da Figura 4 (a), sendo expressa por:

$$\langle H_b^h \rangle = -22,55913 + 7,48379t - 0,86835t^2 + 0,04582t^3 - 9,34882E - 4t^4 \quad (15)$$

onde t é o tempo em horas, e $\langle H_b^h \rangle$ é expresso em MJ/m².

O elevado coeficiente de determinação, $R^2=0,9987$, mostra que a radiação direta horária média anual está bem correlacionada com o tempo em horas.

A Figura 6 mostra a validação da equação temporal (15), efetuada por meio da comparação entre a radiação direta média horária medida (base de dados de 2002) e estimada pela equação (15) em função do tempo em horas, na superfície terrestre.

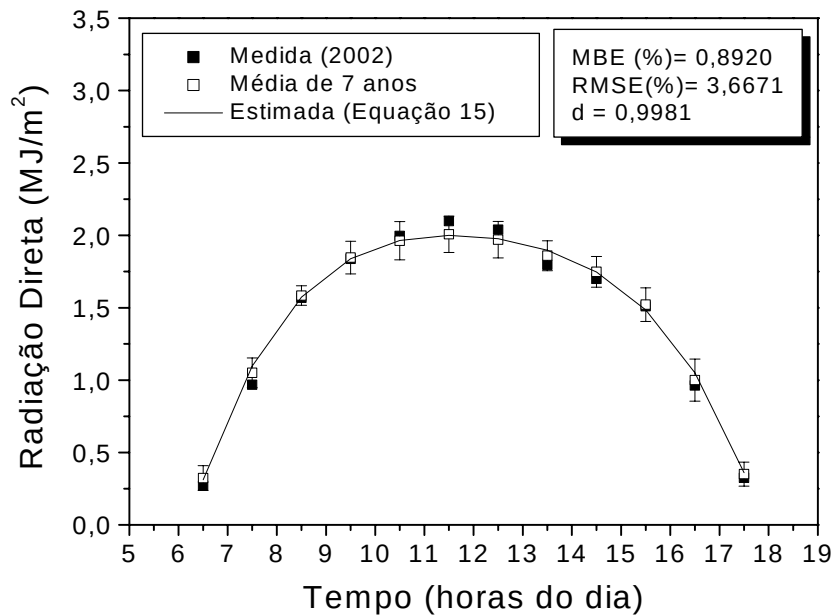


Figura 6. Evolução diurna da radiação direta média horária do ano de 2002 e estimada pela equação (15), e seus respectivos desvios.

A radiação direta medida no ano de 2002 encontra-se em todos os horários no intervalo de variação da estimativa da equação (15). O indicativo estatístico confirma o bom desempenho da equação (15), que no geral subestimou as medidas em menos de 1% (0,9%), causou espalhamento na ordem de 3,7%, e apresentou elevado índice de ajustamento, que na escala de 0 (total desajustamento) a 1 (total ajustamento) foi na ordem de 0,998.

A Figura 7 mostra o efeito da sazonalidade, através da comparação entre a evolução diurna da radiação direta horária média (de 7 anos) $\langle \overline{H_b^h} \rangle$ e média mensal (7 anos) de junho $\langle \overline{H_b^h} \rangle_{JUN}$ e de dezembro $\langle \overline{H_b^h} \rangle_{DEZ}$ na superfície terrestre, em função do

tempo em horas. Os meses de junho e dezembro foram escolhidos por representarem o início das estações do verão e do inverno, respectivamente.

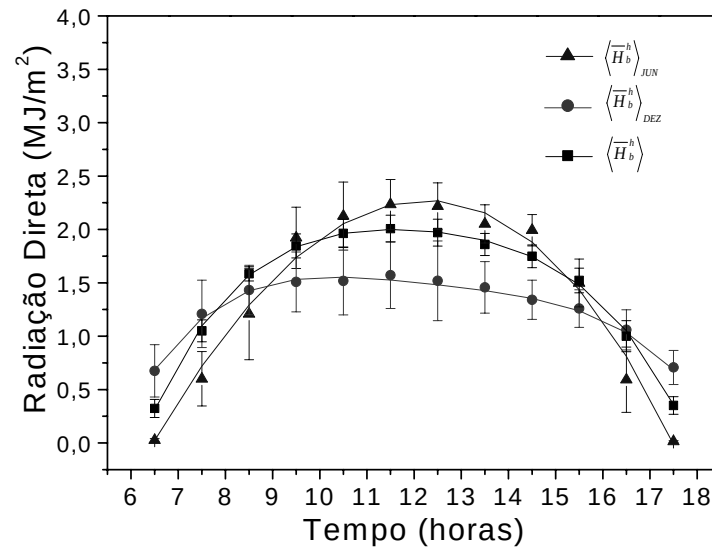


Figura 7. Evolução diurna da radiação direta horária média de junho e dezembro e da radiação direta horária média dos 7 anos.

A radiação direta média dos 7 anos $\langle \overline{H}_b^h \rangle$ está representada por quadrados. As radiações diretas horárias médias mensais $\langle \overline{H}_b^h \rangle_{JUN}$ e $\langle \overline{H}_b^h \rangle_{DEZ}$ estão representados por triângulos (para o mês de junho) e círculos (para o mês de dezembro). O efeito da sazonalidade é notável na comparação entre as evoluções $\langle \overline{H}_b^h \rangle_{JUN}$ e $\langle \overline{H}_b^h \rangle_{DEZ}$, pois são muito diferentes em relação à $\langle \overline{H}_b^h \rangle$. A diferença de energia média horária dos meses de junho e dezembro em relação à energia média horária anual é apresentada na Tabela 1:

Tabela 1. Diferença de energia média horária dos meses de junho e dezembro em relação à energia média horária anual.

Hora	$\Delta_{JUN} = \langle H_b^h \rangle_{JUN} - \langle H_b^h \rangle$	$\Delta_{DEZ} = \langle H_b^h \rangle_{DEZ} - \langle H_b^h \rangle$
7,5	-0,45	0,16
8,5	-0,38	-0,15
9,5	0,08	-0,34
10,5	0,16	-0,44
11,5	0,23	-0,44
12,5	0,25	-0,45
13,5	0,19	-0,40
14,5	0,24	-0,41
15,5	-0,02	-0,26
16,5	-0,41	0,06
17,5	-0,34	0,36

Em alguns intervalos horários as evoluções mensais se invertem em relação à evolução média $\langle \overline{H_b^h} \rangle$. No mês de dezembro, a radiação direta apresenta maior energia nos períodos entre 6h30 e 7h30 da manhã, e no final do dia, entre 16h30 e 18h30, devido à baixa concentração de aerossóis e vapor de água ocasionada pela elevada precipitação característica do mês. Nos horários das 8h30 às 16h30, a energia média mensal é menor que a energia média anual, neste intervalo, os fatores determinantes da absorção são: a nebulosidade, precipitação e a alta concentração de vapor de água.

Para o mês de junho, nos intervalos horários das 7h às 9h e das 15h às 18h a energia da radiação horária média mensal está abaixo da energia média anual, como esperado, porque a energia de junho é menor do ano. No entanto, das 9h às 15h, a energia média mensal superou a energia média anual, contrariando a expectativa, já que a radiação no topo da atmosfera de dezembro é aproximadamente o dobro da de junho. Uma diferença acentuada do número de horas de brilho solar entre junho e dezembro é considerável, como mostrado na figura 2, na qual o período de inverno é aproximadamente

2 vezes maior que do verão, bem como a precipitação de junho é de aproximadamente 0,25 vezes a de dezembro.

Em termos integrados das evoluções da Figura 7, a energia diurna média de junho é de $16,46 \text{ MJ/m}^2$, e de dezembro igual a $14,57 \text{ MJ/m}^2$, enquanto a evolução média anual é de $16,88 \text{ MJ/m}^2$. A diferença de energia entre a média horária anual e a média horária mensal de junho é de 2,5% , enquanto que em dezembro é de 13,7%.

Os resultados mostram que a equação anual estima melhor a radiação direta no mês de junho do que dezembro. Em função dessa variação sazonal, verifica-se a importância do desenvolvimento das evoluções diurnas da radiação direta média mensal horária.

4.1.2 Evolução diurna da radiação direta média mensal horária $\left\langle \overline{H}_b^h \right\rangle_m$

As Figuras 8 e 9 mostram a evolução diária da radiação direta horária média mensal (7 anos) $\left\langle \overline{H}_b^h \right\rangle_m$, onde m assume os meses de Janeiro a Dezembro, e seus respectivos desvios. As evoluções diurnas médias mensais são diferentes, pois dependem da variabilidade atmosférica diária característica de cada mês de cada ano. Os meses do verão e da primavera, estações com maior nível de nebulosidade, possuem energias horárias menores, e por essa razão, as evoluções são mais achatadas que dos meses do outono e inverno.

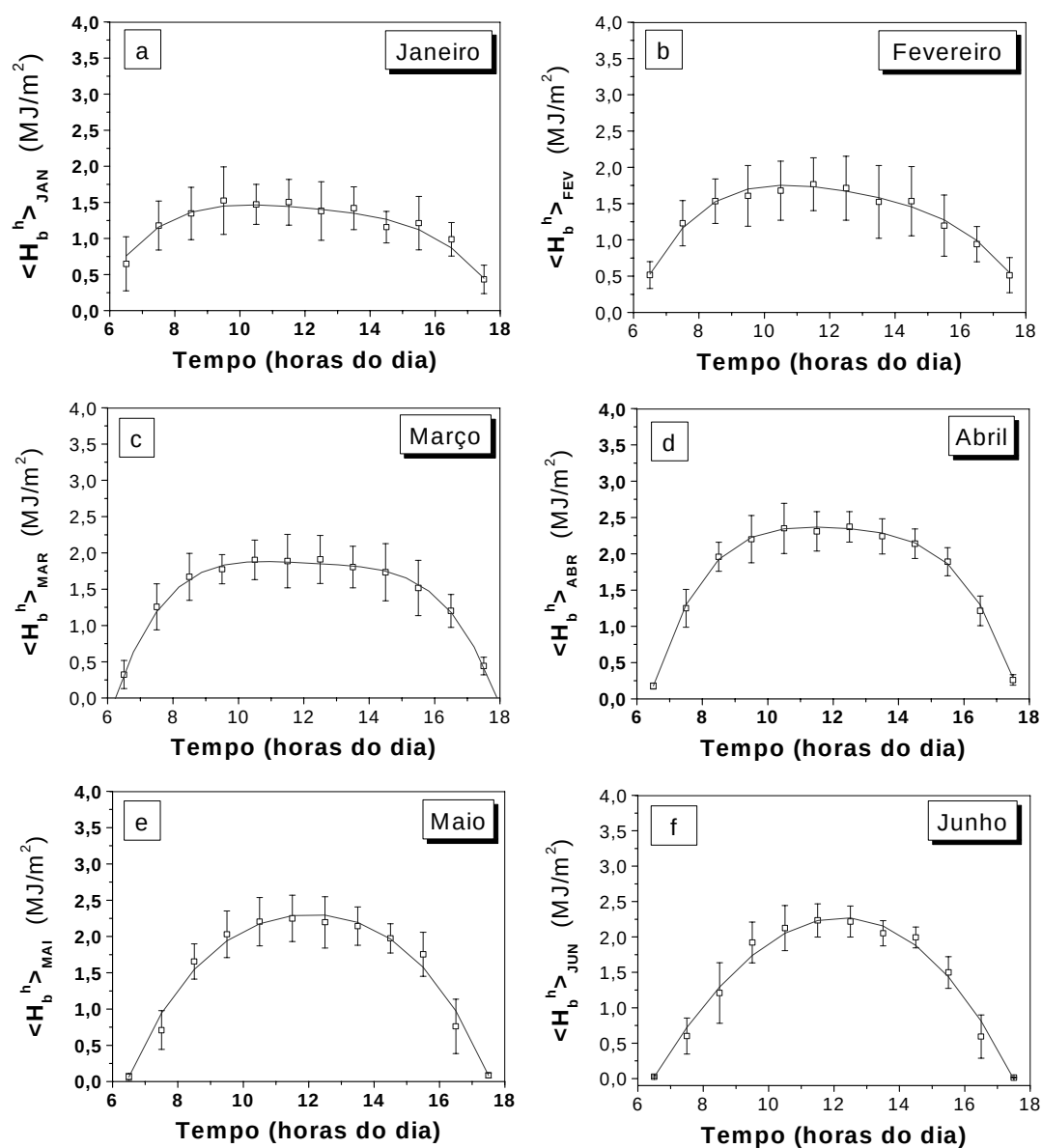


Figura 8. Evolução diária da radiação média mensal horária dos meses de Janeiro a Junho e seus respectivos desvios.

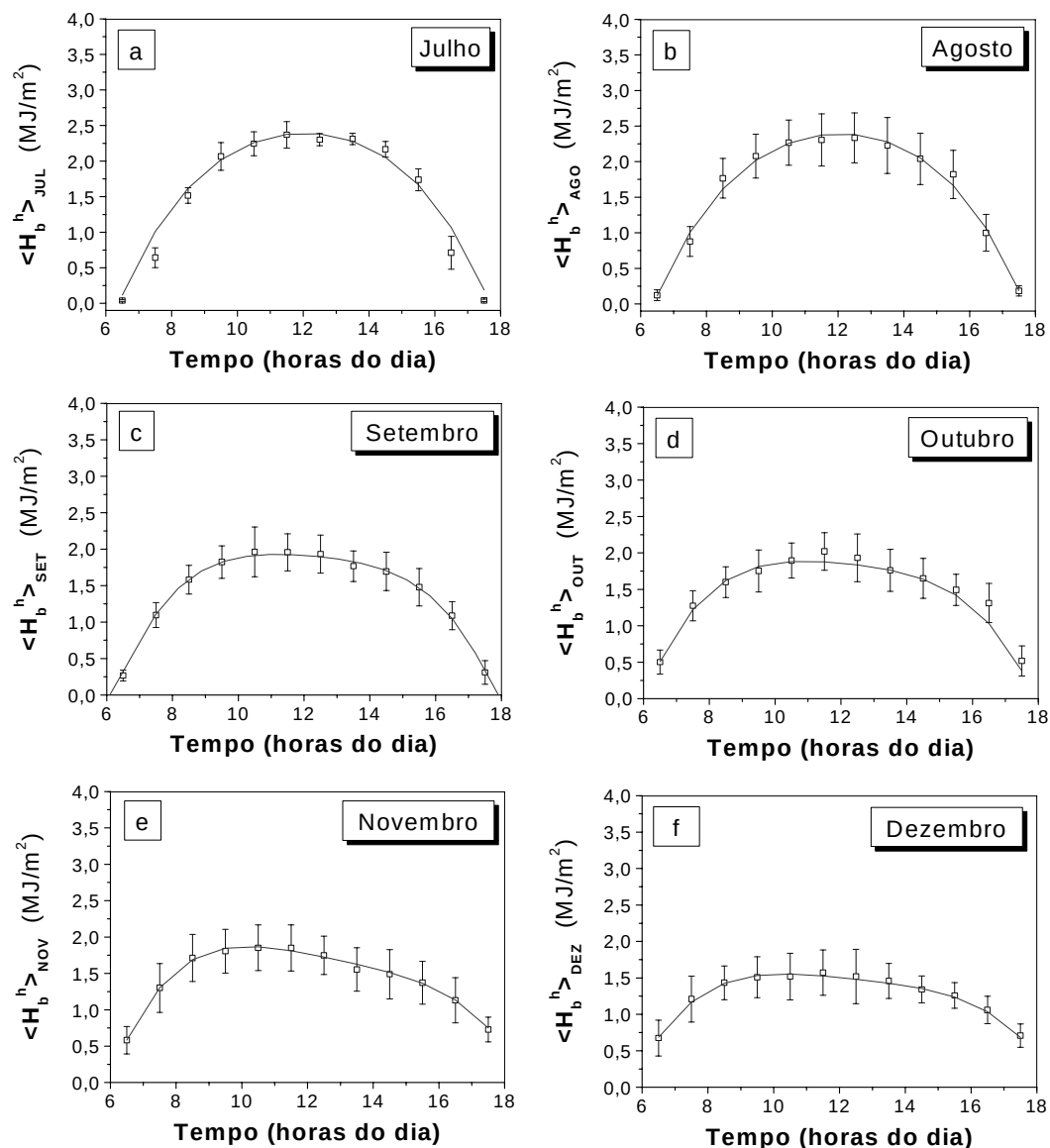


Figura 9. Evolução diária da radiação média mensal horária dos meses de Julho a Dezembro e seus respectivos desvios.

Os desvios percentuais (das médias mensais de H_b^h) são dependentes das variações da nebulosidade, precipitação, e concentrações de aerossóis e vapor de água de cada mês entre os anos. Os meses de abril, maio, julho, setembro e

outubro situaram-se a um nível inferior a 15%, enquanto que nos meses de janeiro, fevereiro, março, junho, agosto, novembro e dezembro entre 15 e 25%.

As equações ajustadas por regressão polinomial (onde o parâmetro t é a hora do dia) para os meses de janeiro a dezembro estão representadas no quadro abaixo:

Tabela 2. Coeficientes de regressão dos modelos de estimativa da radiação direta média mensal horária e o integrado diário no horário das 6h às 18h.

Mês	$\langle H_b^h \rangle = \sum_{i=0}^4 a_i t^i, (t = 6,5;7,5;8,5;\dots;17,5)$						$\int_{t_i=6}^{t_f=18} \langle H_b^h \rangle dt$ (MJ m ⁻²)
	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	R^2	
Janeiro	-20,72750	7,42037	-0,91751	0,04993	-1,020E-03	0,96981	13,73
Fevereiro	-19,18753	6,47091	-0,74733	0,03854	-7,595E-04	0,99227	15,23
Março	-31,87479	11,10564	-1,36734	0,07477	-1,540E-03	0,99776	17,04
Abril	-38,48424	13,13208	-1,59225	0,08649	-1,780E-03	0,99939	20,14
Maio	-20,09147	6,22461	-0,67612	0,03481	-7,277E-04	0,99487	17,76
Junho	-7,53893	1,59327	-0,07203	0,00126	-5,382E-05	0,99646	16,46
Julho	-16,52785	4,97845	-0,52811	0,02771	-6,115E-04	0,99707	18,10
Agosto	-20,06394	6,20909	-0,67076	0,03437	-7,164E-04	0,99549	18,87
Setembro	-27,77667	9,42773	-1,12814	0,06056	-1,240E-03	0,99896	16,67
Outubro	-23,44835	8,06359	-0,96589	0,05186	-1,060E-03	0,98734	17,20
Novembro	-11,80433	3,99553	-0,44620	0,02284	-4,608E-04	0,99247	17,17
Dezembro	-16,19608	5,69041	-0,67914	0,03593	-7,173E-04	0,99573	14,57

Os valores de R^2 para os meses de janeiro a dezembro são elevados, excedendo os 0,97 para a maioria dos meses.

Percentualmente, os meses de janeiro, fevereiro, junho, setembro e dezembro são menos energéticos que $\langle \overline{H_b^h} \rangle$, enquanto que os meses de março, abril, maio, julho, agosto, outubro e novembro são mais energéticos que $\langle \overline{H_b^h} \rangle$. As maiores discordâncias em relação à $\langle \overline{H_b^h} \rangle$ ocorrem nos meses de abril e janeiro, que são 19,2%

maior e 18,7% menor que $\langle \overline{H}_b^h \rangle$, respectivamente. A maior concordância com $\langle \overline{H}_b^h \rangle$ ocorre com os meses de março, setembro, outubro e novembro, onde as diferenças de energia diária são inferiores a 2%, enquanto que janeiro, abril, agosto e dezembro, são acima de 12% em relação a $\langle \overline{H}_b^h \rangle$.

Estes resultados confirmam a necessidade de desenvolvimento de equações mensais de estimativa da radiação direta média mensal horária, já que em determinados meses específicos, a equação (15) pode ocasionar imprecisão na estimativa na ordem de até 3,25MJ/m² por dia.

A validação das equações mensais foi efetuada por meio da comparação entre medida e a estimativa pelas equações anual e mensal, como pode ser visto nas Figuras 10 e 11. Por meio dos indicativos estatísticos MBE, RMSE, e d de Willmott avaliou-se o desempenho das equações mensais (16 a 26) e anual (15) na estimativa da radiação direta horária mensal. As Figuras permitem visualizar se equações mensais levam vantagem ou não em relação à anual na estimativa da radiação direta, bem como se ambas estão sendo eficientes na estimativa da direta em cada um dos 12 meses em estudo.

Para análise das equações mensais e anual na estimativa da radiação direta, integraram-se as evoluções diárias: $(\overline{H}_b^h)_{2002}$, $\langle H_b^h \rangle$, $\langle H_b^h \rangle_{JAN}$, $\langle H_b^h \rangle_{FEV}$, $\langle H_b^h \rangle_{MAR}$, $\langle H_b^h \rangle_{ABR}$, $\langle H_b^h \rangle_{MAI}$, $\langle H_b^h \rangle_{JUN}$, $\langle H_b^h \rangle_{JUL}$, $\langle H_b^h \rangle_{AGO}$, $\langle H_b^h \rangle_{SET}$, $\langle H_b^h \rangle_{OUT}$, $\langle H_b^h \rangle_{NOV}$, $\langle H_b^h \rangle_{DEZ}$ e os resultados (em MJ/m²) estão representados na Tabela 3:

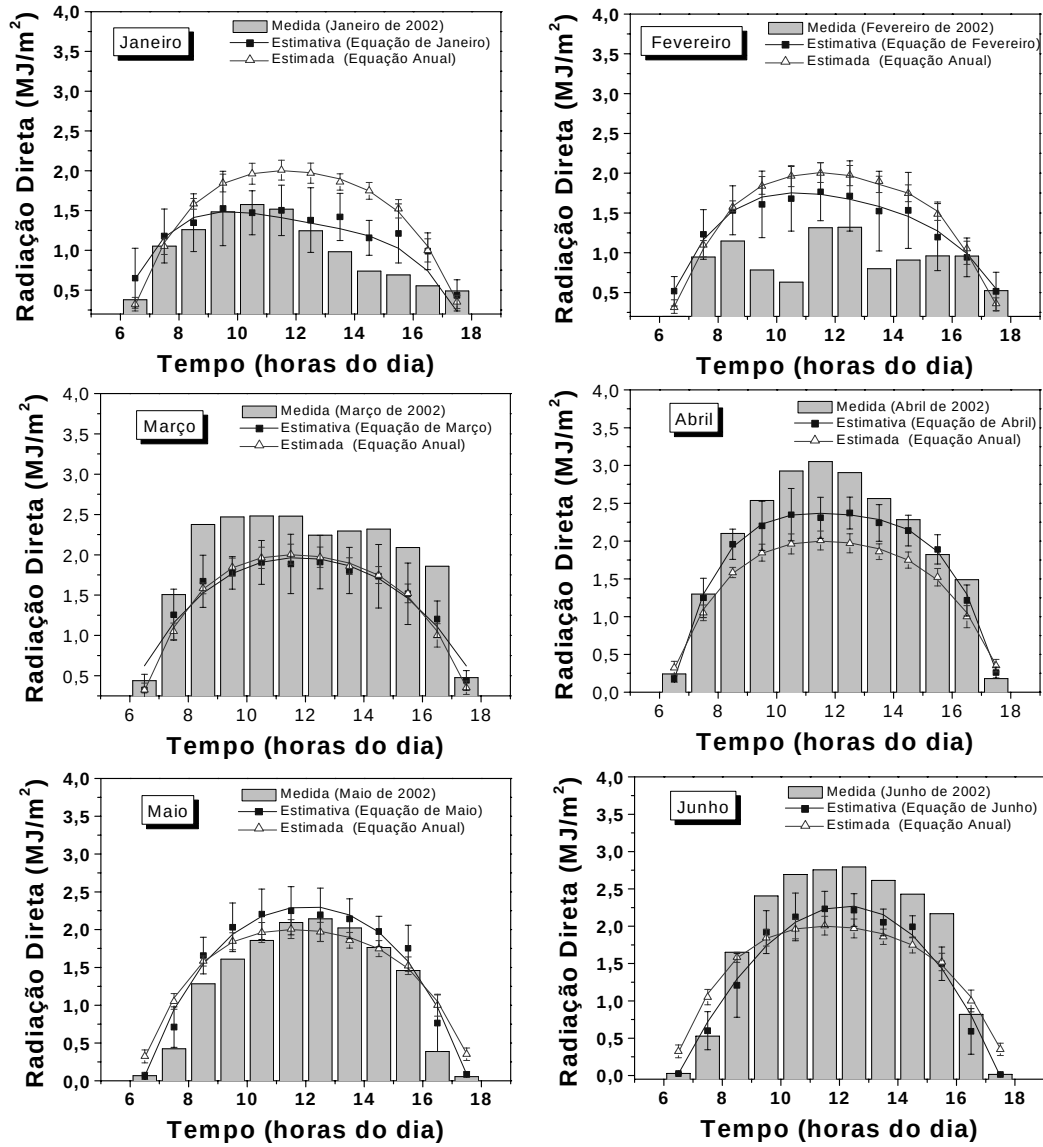


Figura 10. Radiação direta estimada pelas equações $\langle H_b^h \rangle_{\text{JAN}}$, $\langle H_b^h \rangle_{\text{FEV}}$, $\langle H_b^h \rangle_{\text{MAR}}$, $\langle H_b^h \rangle_{\text{ABR}}$, $\langle H_b^h \rangle_{\text{MAI}}$, $\langle H_b^h \rangle_{\text{JUN}}$ e anual $\langle H_b^h \rangle$ e a radiação direta medida no ano de 2002 $(\bar{H}_b^h)_{2002}$.

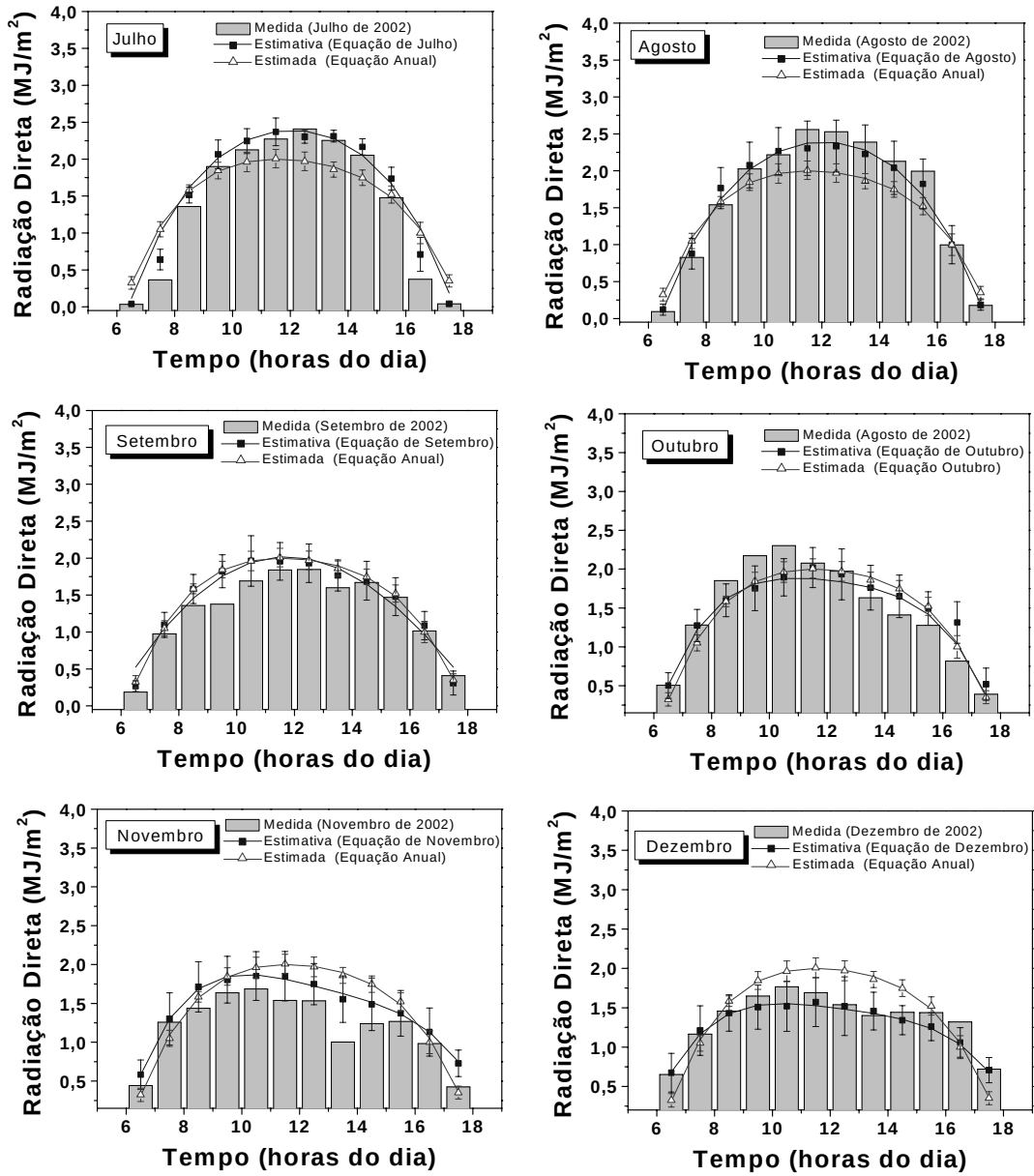


Figura 11. Radiação direta estimada pelas equações mensais $\langle H_b^h \rangle_{JUL}$, $\langle H_b^h \rangle_{AGO}$, $\langle H_b^h \rangle_{SET}$, $\langle H_b^h \rangle_{OUT}$, $\langle H_b^h \rangle_{NOV}$, $\langle H_b^h \rangle_{DEZ}$ e anual $\langle H_b^h \rangle$ e a radiação direta medida no ano de 2002 $(\overline{H_b^h})_{2002}$.

Tabela 3. Integração das evoluções diárias para $(\overline{H}_b^h)_{2002}$, $\langle H_b^h \rangle_x$ e $\langle H_b^h \rangle$

Mês	Medido Ano 2002	Estimado Eq. Mensais	Estimado Eq. Anual
	(MJ/m ²)	(MJ/m ²)	(MJ/m ²)
Janeiro	11,53	12,94	16,97
Fevereiro	10,12	15,39	16,97
Março	22,58	17,03	16,97
Abril	23,19	20,33	16,97
Mai	15,1	17,98	16,97
Junho	20,88	16,6	16,97
Julho	16,63	18,88	16,97
Agosto	19,34	18,88	16,97
Setembro	15,14	16,57	16,97
Outubro	17,24	16,55	16,97
Novembro	14,01	16,55	16,97
Dezembro	15,55	14,43	16,97

O diferencial energético (em MJ/m²) entre os integrados das medidas de 2002 e das estimadas pelas equações mensais de janeiro a dezembro mostram ocorre superestimativa da medida nos meses de janeiro (1,41MJ/m²), fevereiro (5,27MJ/m²), maio (2,88MJ/m²), julho (2,25MJ/m²), setembro (1,43MJ/m²) e novembro (2,54MJ/m²), e subestimativa das medidas nos meses de março (5,55MJ/m²), abril (2,86MJ/m²), junho (4,28MJ/m²), agosto (0,46MJ/m²), outubro (0,69MJ/m²) e dezembro (1,12MJ/m²). Já o diferencial energético (em MJ/m²) entre os integrados das medidas de 2002 e das estimadas pelas equações a equação anual mostram ocorrer superestimativa das medidas nos meses de janeiro (5,44MJ/m²), fevereiro (6,85MJ/m²), maio (1,87MJ/m²), julho (0,34MJ/m²), setembro (1,83MJ/m²), novembro (2,96MJ/m²) e dezembro (1,12MJ/m²), e subestimativa nos meses de março (5,55MJ/m²), abril (2,86MJ/m²), junho (4,28MJ/m²), agosto (0,46MJ/m²) e outubro (0,69MJ/m²).

Em termos integrados, as equações mensais apresentam melhor desempenho que a anual na estimativa da radiação direta média mensal horária, com exceção ao mês de março, para o qual a equação anual foi mais efetiva que a mensal, devido aos melhores resultados obtidos nos indicativos estatísticos.

A Tabela 4 mostra os resultados da validação da equação anual (15) nos meses de janeiro a dezembro. O indicativo MBE confirma que a equação sub/superestima as medidas entre 2,2% (outubro) e 65,2% (fevereiro), promovendo subestimativa nos meses de março, abril, junho, agosto e outubro, e superestima dos valores experimentais nos meses de janeiro, fevereiro, maio, julho, setembro, novembro e dezembro. O indicativo RMSE mostrou a ocorrência de espalhamento entre 15,9% (setembro) e 82,6% (fevereiro), enquanto que o indicativo d de Willmott mostra ocorrer ajustamento entre 0,54 (fevereiro) e 0,97 (outubro).

Tabela 4. Resultados da validação da equação (15) nos meses de Janeiro a Dezembro

Modelo	MBE (%)	RMSE (%)	d
Janeiro	44,620	57,186	0,73
Fevereiro	65,183	82,591	0,54
Março	-24,882	27,370	0,86
Abril	-26,059	32,344	0,85
Maio	14,139	25,536	0,94
Junho	-17,215	33,648	0,87
Julho	3,831	27,340	0,93
Agosto	-11,141	21,918	0,94
Setembro	12,085	15,938	0,97
Outubro	-2,168	15,974	0,96
Novembro	19,774	31,319	0,86
Dezembro	6,565	21,781	0,90

Os resultados da validação das equações mensais através dos indicativos estatísticos estão apresentados na Tabela 5. O indicativo estatístico MBE mostra

que as equações mensais para os meses de março, abril, junho, agosto, outubro e dezembro subestimam as medidas entre 2,25% (agosto) e 32,2% (março), enquanto que as equações para os meses de janeiro, fevereiro, junho, setembro e novembro superestimaram os valores experimentais entre 0,6% (setembro) e 52% (fevereiro).

Tabela 5. Resultados da validação das equações mensais nos meses de Janeiro a Dezembro

Modelo	MBE (%)	RMSE (%)	d
Janeiro	11,799	22,997	0,91
Fevereiro	52,080	63,819	0,59
Março	-32,198	34,299	0,81
Abril	-12,121	17,498	0,96
Maio	19,089	23,368	0,96
Junho	-20,553	26,796	0,94
Julho	14,219	21,477	0,97
Agosto	-2,251	8,457	0,99
Setembro	0,630	17,096	0,96
Outubro	-3,918	14,670	0,96
Novembro	19,165	22,455	0,90
Dezembro	-6,918	10,058	0,95

As equações mensais para os meses de janeiro, fevereiro, abril, agosto setembro e novembro apresentaram melhor desempenho que a equação anual (15) no indicativo estatístico MBE, já no indicativo RMSE, todas as equações mensais apresentam melhor desempenho que a anual, com exceção de setembro, onde a equação anual foi melhor que a mensal. No indicativo d de Willmott, em todos meses as equações mensais apresentam ajustamento superior à equação anual, com exceção de março.

A escolha dos modelos depende da sub/superestimativa, espalhamento e ajustamento desejáveis na estimativa, para cada mês. Com base nos três índices simultâneos é recomendável a utilização da equação anual.

4.1.3 Evolução Anual das Radiações Médias Mensais

A Figura 12 mostra a evolução anual da radiação direta diária média mensal em função do tempo (em meses) para os anos de 1996 a 2003 (menos 2002), representada por: $(\bar{H}_b^m)_{1996}$, $(\bar{H}_b^m)_{1997}$, $(\bar{H}_b^m)_{1998}$, $(\bar{H}_b^m)_{1999}$, $(\bar{H}_b^m)_{2000}$, $(\bar{H}_b^m)_{2001}$ e $(\bar{H}_b^m)_{2003}$.

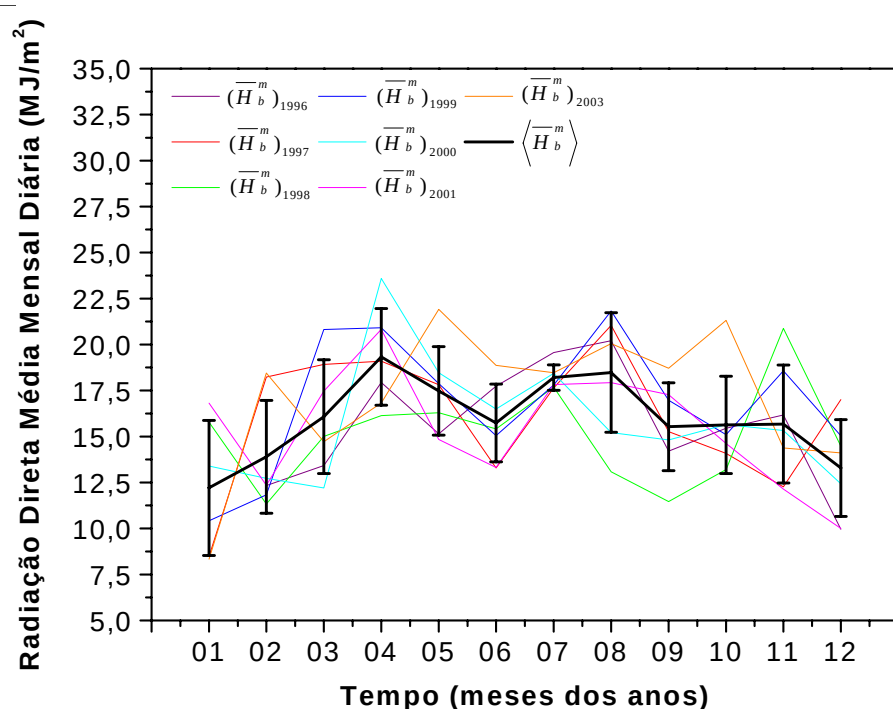


Figura 12. Evolução anual da radiação direta diária (média mensal) $(\bar{H}_b^m)_{1996}$, $(\bar{H}_b^m)_{1997}$, $(\bar{H}_b^m)_{1998}$, $(\bar{H}_b^m)_{1999}$, $(\bar{H}_b^m)_{2000}$, $(\bar{H}_b^m)_{2001}$, $(\bar{H}_b^m)_{2003}$, curva média mensal de 7 anos da irradiação direta $\langle \bar{H}_b^m \rangle$ e seus respectivos desvios $\langle \delta \bar{H}_b^m \rangle$ em função do tempo em meses.

A evolução para cada ano apresentou uma variação singular, dependente das condições atmosféricas relacionadas à nebulosidade, precipitação, e

concentrações de vapor de água e aerossóis de cada mês. Nos meses em que tais fatores foram pequenos, a transmissividade atmosférica da radiação direta foi elevada, e vice versa.

A Figura 13 mostra a evolução anual média dos 7 anos com os desvios, em função do tempo em meses resultante da Figura 12, e a evolução das médias mensais do número de horas de brilho solar.

As duas evoluções mostram que $\langle \overline{H}_b^m \rangle$ está bem relacionado com o número de horas de brilho solar $\bar{n}$ na maioria dos meses, como fevereiro, março, maio, junho, julho, agosto, setembro, outubro e novembro, enquanto que nos meses de janeiro, abril e dezembro a correlação é regular, muito provavelmente devido às variações de aerossóis e vapor de água, que são mais intensas nesses meses.

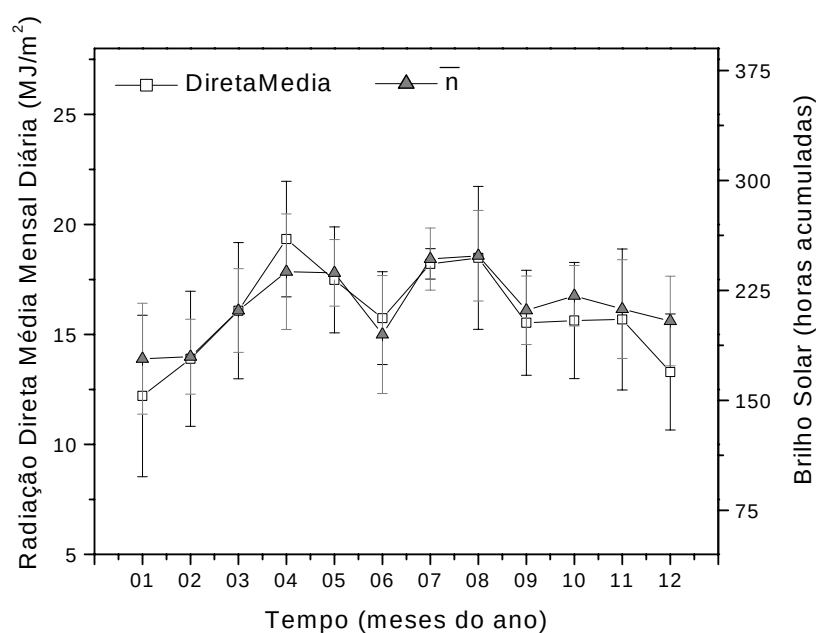


Figura 13. Evolução anual irradiação direta média mensal de 7 anos $\langle \overline{H}_b^m \rangle$ e seus respectivos desvios $\langle \delta \overline{H}_b^m \rangle$ e o número de horas de brilho solar ($\bar{n}$) acumulado mensal, médio de 7 anos, em função do tempo em meses.

A Figura 14 mostra a evolução dos desvios das médias percentuais da radiação direta entre os 7 anos. Os desvios relativos da média $\langle \delta \overline{H}_b^m \rangle$ são maiores nos meses de janeiro, fevereiro novembro e dezembro, com valores superiores a 20%. Nos meses de março, abril, maio, junho, agosto, setembro e outubro situaram-se entre 13 e 20%, e junho com 4%. O desvio relativo médio da evolução anual da radiação direta média mensal foi igual a 17,18%, e superior ao desvio relativo médio da evolução diária da radiação direta das médias horárias anual, igual a 7,33%.

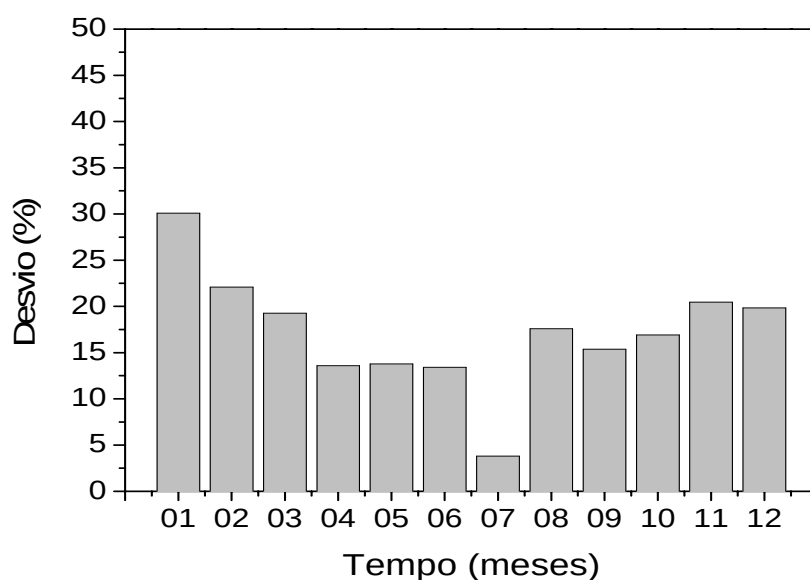


Figura 14. Evolução anual dos desvios das médias percentuais da radiação direta entre os 7 anos.

A Figura 15 mostra as evoluções da radiação direta média mensal diária e da Precipitação acumulada média de 7 anos, em função do tempo em meses. A evolução anual da radiação direta mostra que os meses de abril, maio, julho e agosto, são os meses com maior energia, e os meses de janeiro, fevereiro e dezembro, os de menor

disponibilidade energética. Os meses de março, junho, setembro, outubro e novembro encontram-se em um nível intermediário.

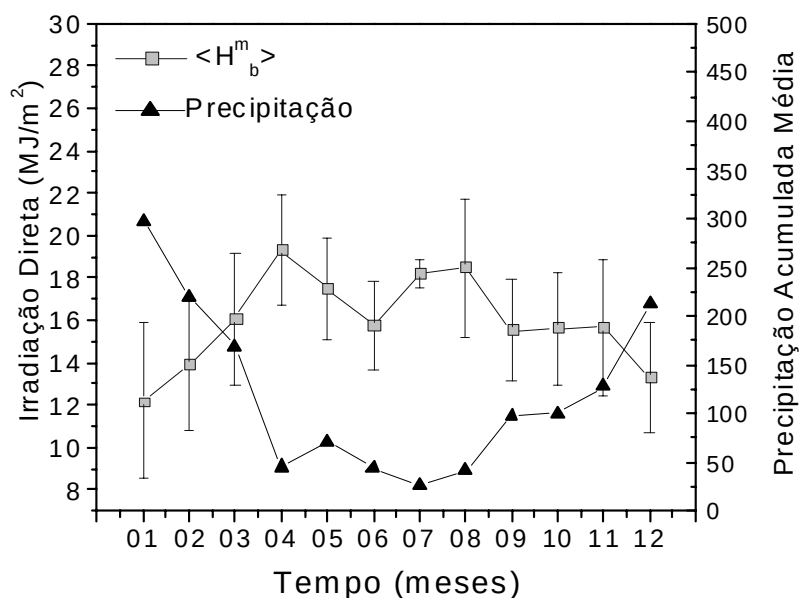


Figura 15. Evolução anual da radiação direta média mensal e da precipitação acumulada média de 7 anos, em função do tempo em meses.

Uma análise da evolução da radiação direta e da precipitação acumulada média (em mm), confirma a dependência inversa das duas variáveis. Nos períodos chuvosos, constituídos dos meses de janeiro, fevereiro, março, e abril, a precipitação decresce de um nível de 250mm para 50mm, no sentido de que a radiação direta aumenta de 12,2MJ/m²/mês para 19,4MJ/m²/mês; de setembro a dezembro, também no período chuvoso a precipitação tende a crescer de 103mm a 215mm, enquanto que a radiação direta decresce de 15,5MJ/m²/mês a 13,3MJ/m²/mês. Entre abril e agosto, período de seca, o nível de precipitação foi inferior a 100mm, enquanto que a radiação situou-se por volta de 17MJ/m².

A Figura 16 mostra a curva polinomial ajustada à evolução da radiação direta média mensal dos 7 anos, e a fração radiométrica $\langle K_b^m \rangle$.

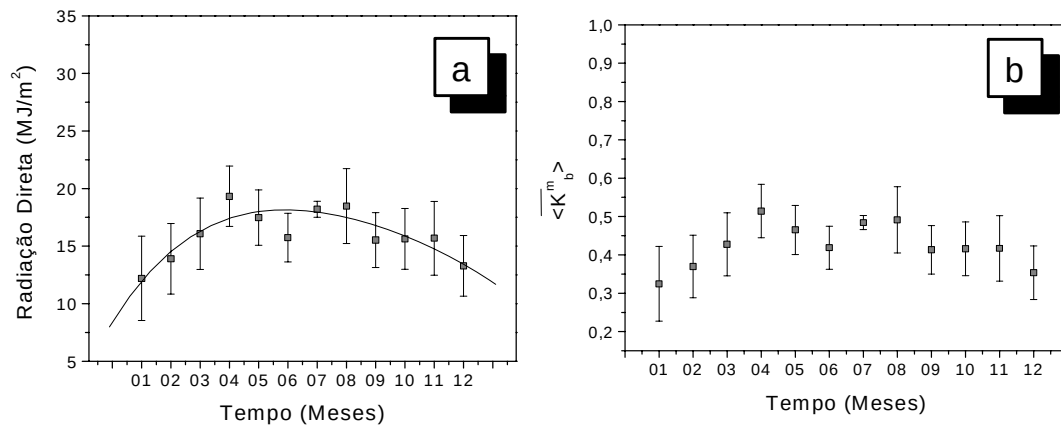


Figura 16. Evolução da radiação direta média mensal com a curva polinomial ajustada e da fração média mensal dos 7 anos.

A equação temporal para a evolução anual é polinomial de quarta ordem, conforme abaixo representada:

$$\langle H_b^m \rangle = 8,40 + 4,1t - 0,58t^2 + 0,03t^3 - 0,0008t^4 \quad (16)$$

onde t representa o tempo em meses.

O coeficiente de determinação ($R^2 = 0,75$) expressa que a qualidade do ajuste é regular, tendo em vista que 40% das médias estão externas à curva ajustada. Se os desvios forem levados em consideração, apenas um ponto (mês de junho) não estaria sendo contemplado pela curva ajustada.

A evolução da fração média mensal (Figura 16b) $\langle \overline{K}_b^m \rangle$ seguiu também a mesma tendência da evolução anual da radiação $\langle \overline{H}_b^m \rangle$ (figura 16a), em diferente ordem de grandeza, já que representa uma fração da radiação direta média mensal. A fração média mensal é obtida dividindo-se a radiação média mensal (diária) pela constante solar média mensal diária ($37,59 \text{ MJ/m}^2$ por dia), e reflete a dependência da atmosfera quanto à concentração da nebulosidade, precipitação, aerossóis e vapor de água dos meses. A evolução mostra que a fração $\langle \overline{K}_b^m \rangle$, inicia com 30,0% em janeiro, crescendo até abril quando atinge 62,0%. Em maio decresce para 43,0%, em junho cresce para 58,0%, decrescendo, a seguir, até setembro com 38,05% e oscilando sucessivamente, até dezembro com percentual de 40,0%.

A Figura 17 mostra a comparação da direta estimada pela equação (16) e a medida do ano de 2002 em função do tempo em meses. Nos meses de fevereiro, março, abril, e junho, as estimativas com os desvios não representam a medida em todos os meses, o modelo superestimou em fevereiro (em $5,95 \text{ MJ/m}^2$), e subestimou a medida em março ($7,12 \text{ MJ/m}^2$) abril ($-5,87 \text{ MJ/m}^2$) e junho ($3,64 \text{ MJ/m}^2$).

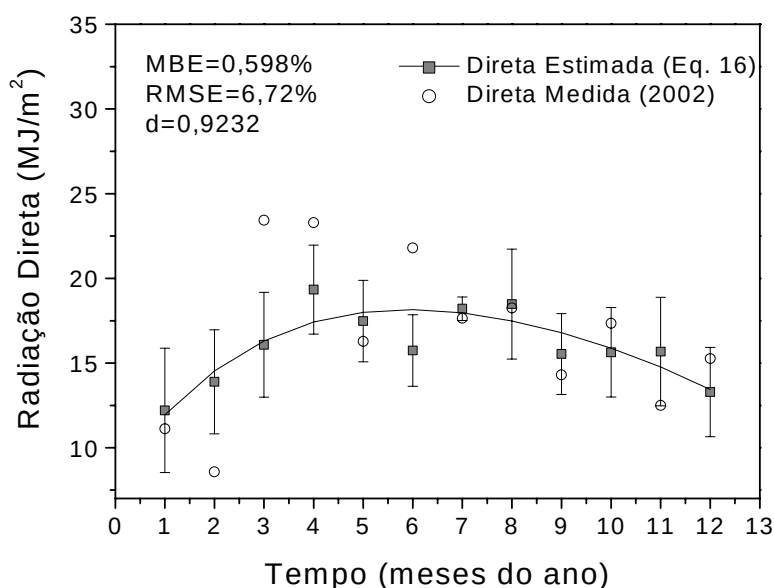


Figura 17. Evolução da radiação direta medida (média mensal dos 7 anos) e estimada pela equação (16), e a curva polinomial ajustada.

Nos demais meses, a medida está inserida dentro do intervalo de variação da estimativa. A escolha do ano de 2002 penalizou a validação, tendo em vista que no mês de fevereiro aproveitou-se apenas 18 dias de medidas. Neste período, fortes chuvas, e fenômenos elétricos danificaram o sistema de rastreamento solar, de forma que parte das medidas não pôde ser aproveitada. A consequência da falta de 10 dias diminuiu consideravelmente a média, prejudicando a análise do desempenho do modelo.

A validação da equação (16) segundo os indicativos estatísticos, mostrou ocorrer superestimativa da medida em menos de 1% (0,598%), espalhamento de 6,72% e ajustamento na ordem de 0,9232.

A Figura 18 (a) mostra a comparação entre o número de horas de brilho solar de 2002 com a curva média dos 7 anos e (b) a comparação entre a precipitação de 2002 e a curva média de precipitação dos 7 anos.

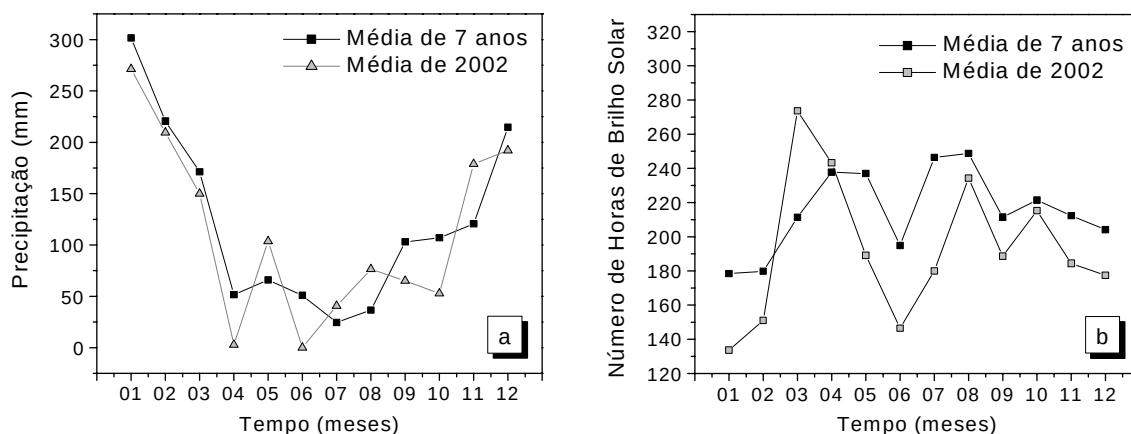


Figura 18. (a) Comparação entre o número de horas de brilho solar de 2002 com a curva média dos 7 anos; e (b) Comparação entre a precipitação de 2002 e a curva média de precipitação dos 7 anos.

A precipitação do ano de 2002 foi inferior à precipitação média nos meses de fevereiro, março, abril e junho, nos quais as estimativas não concordam com as medidas, o que leva a entender que quanto menor a precipitação, maior é a radiação direta na superfície terrestre, razão pela qual os meses de março, abril e junho a medida excede a estimativa. No mês de fevereiro, apesar da precipitação ter sido inferior à precipitação média, a estimativa e a medida encontram-se muito próximas, indicando assim que a precipitação não é o responsável pelo baixo nível de radiação, a ponto de ocorrer superestimativa.

É muito provável que o elemento responsável pelo baixo nível de radiação solar direta seja o número de horas de brilho solar, conforme mostrado na Figura 18(b). No mês de fevereiro, o número de horas de brilho solar acumulado foi inferior ao número de horas de brilho solar acumulado médio de 7 anos, bem como a radiação média de 2002 foi inferior ao valor estimado pela equação (16).

4.2 Modelos de Estimativa

4.2.1 Modelo de Estimativa Estatístico de Liu & Jordan

4.2.1.1 Modelo Horário

A Figura 19 (a) mostra as correlações entre K_b^h e K_T^h horários de 7 anos (27150 horas) e a Figura 19 (b), a correlação média de $(\overline{K_b^h})$ função de intervalos discretos de K_T^h . A fração K_b^h cresce no sentido que K_T^h aumenta, e é elevada a variação de K_b^h para um valor fixo de K_T^h , resultando no grande espalhamento da correlação. Segundo Olmo et al., (1996), este elevado espalhamento de K_b^h , principalmente na partição horária, se deve a demais variáveis além K_T^h , que são dependentes das condições locais e não foram contabilizadas na estimativa. Jeter & Balaras (1990) indicam que a massa ótica é um parâmetro dominante que afeta a relação $K_b^h \times K_T^h$. Lopez et al., (2000), propuseram modelos do tipo $K_b^h \times K_T^h$ utilizando o $\cos(z)$ como um parâmetro adicional, melhorando a correlação.

Outros autores (Garrison, 1985; Skartveit & Olseth, 1987; Reindl et al., 1990; Camps & Soler, 1992; Lopez et al., 2000) apontam para a dependência da relação $K_b^h \times K_T^h$ com a elevação solar e vapor de água na atmosfera.

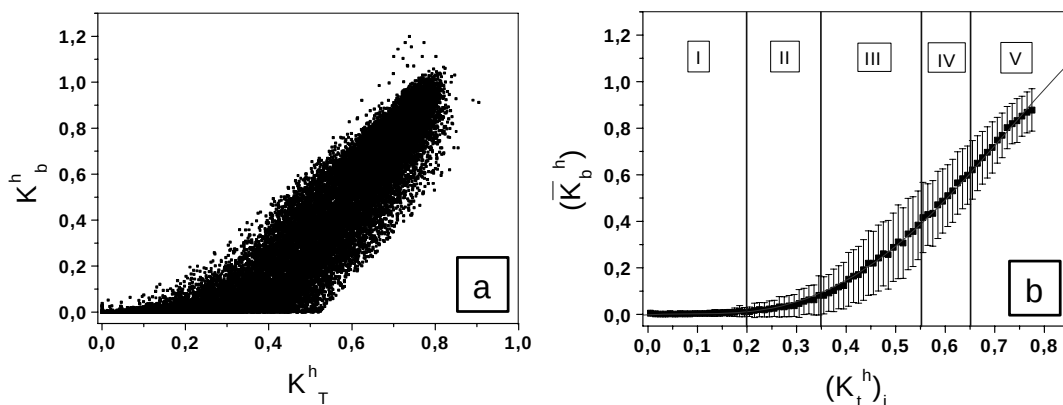


Figura 19. (a) Correlações entre valores de K_b^h e K_T^h ; (b) Curva média $(\overline{K_b^h})$ função de intervalos discretos de $(K_T^h)_i$.

Com objetivo de buscar uma tendência média de variação de K_b^h por K_T^h , determinaram-se os valores médios de K_b^h em funções de intervalos discretos (centesimais) de K_T^h , da Figura 19(a). O intervalo total de K_T^h foi sub-dividido em 100 sub-intervalos, onde $(K_T^h)_i$ representa o sub-intervalo i (de 0,01 em 0,01 unidades) de K_T^h . Para cada sub-intervalo $(K_T^h)_i$ calcularam-se a média $(\overline{K_b^h})$ e o desvio $(\delta \overline{K_b^h})$ de K_b^h , resultando na Figura 19(b). Tal metodologia foi adotada seguindo os trabalhos de Orgill & Hollands (1977), Bartoli et al., (1982) e Erbs et al., (1982).

A fração $(\overline{K_b^h})$, quando $(K_T^h)_i$ assume valores superiores a 0,775, não apresenta uma dependência lógica, e por esta razão, tais valores foram eliminados da correlação. Acima do intervalo de $(K_T^h)_i = 0,775$, a fração $(\overline{K_b^h})$ diminui devido a multireflexões causadas por nuvens adjacentes, principalmente na condição de céu parcialmente nublado. Nesta condição, a fração direta $(\overline{K_b^h})$ diminui enquanto a fração

difusa ($\overline{K_d}^h$) aumenta, como mostrado em vários trabalhos com a radiação difusa (Liu & Jordan, 1960; e Suehrcke & McCormick 1988).

A Figura 19(b) mostra que $(\overline{K_b}^h)$ não é linear com $(K_T^h)_i$. No intervalo I, cobertura de céu extremamente nublado ($(K_T^h)_i \leq 0,2$), a fração média $(\overline{K_b}^h)$ é praticamente igual zero. No intervalo II, cobertura de céu nebuloso ($0,2 < (K_T^h)_i \leq 0,35$), ocorre ligeira elevação nos valores de $(\overline{K_b}^h)$ de 0,01 a 0,08. No intervalo III, cobertura de céu parcialmente nublado com dominância difusa ($0,35 < (K_T^h)_i \leq 0,55$), $(\overline{K_b}^h)$ tem um aumento de 0,08 a 0,39. Em IV, cobertura de céu parcialmente nublado com dominância de céu aberto ($0,55 < (K_T^h)_i \leq 0,65$), a fração $(\overline{K_b}^h)$ se eleva de 0,40 a aproximadamente 0,61. No intervalo, cobertura de céu aberto ou sem nuvens ($(K_T^h)_i > 0,65$), a fração $(\overline{K_b}^h)$ se elevou de 0,61 a 0,88, onde atinge a transmissividade máxima.

O maior desvio da média ocorre no intervalo III, que na média foi de 64,3%, enquanto que nos intervalos IV e V na ordem de 27,7% e 13,5%, respectivamente. Os desvios nos intervalos I e II são inferiores aos demais intervalos.

Nestas condições de cobertura de céu, a Figura 19(b) gerou uma equação polinomial de quarto grau, ajustada por meio de regressão, com $R^2=0,99815$, expressa por:

$$(\overline{K_b}^h) = -0,00155 + 0,12676 (K_T)_i - 1,58239 (K_T)_i^2 + 7,25785 (K_T)_i^3 - 4,48318 (K_T)_i^4 \quad (17)$$

O elevado coeficiente de determinação (R^2) é na ordem de 0,998. Diversos autores obtiveram resultados semelhantes seguindo a proposta de Liu & Jordan para a direta na incidência: Em Marrocos, Rerhrhaye et al., (1995), obtiveram R^2 entre 0,90 e 0,91; na Espanha, Olmo et al., (1996) encontraram valores de R^2 entre 0,89 e 0,62; em Hong Kong, Lam & Li (1996) encontraram R^2 entre 0,912 na estação fria, e 0,988 no modelo anual e na Espanha, Lopez et al., (2000) obtiveram R^2 entre 0,89 e 0,948.

A validação pela comparação entre a medida de K_b^h e a estimada pela equação (17) é mostrada na Figura 20, com os indicativos estatísticos MBE, RMSE e d. A correlação é composta por 4116 pontos experimentais e a reta de 45° representa a reta ideal (1:1).

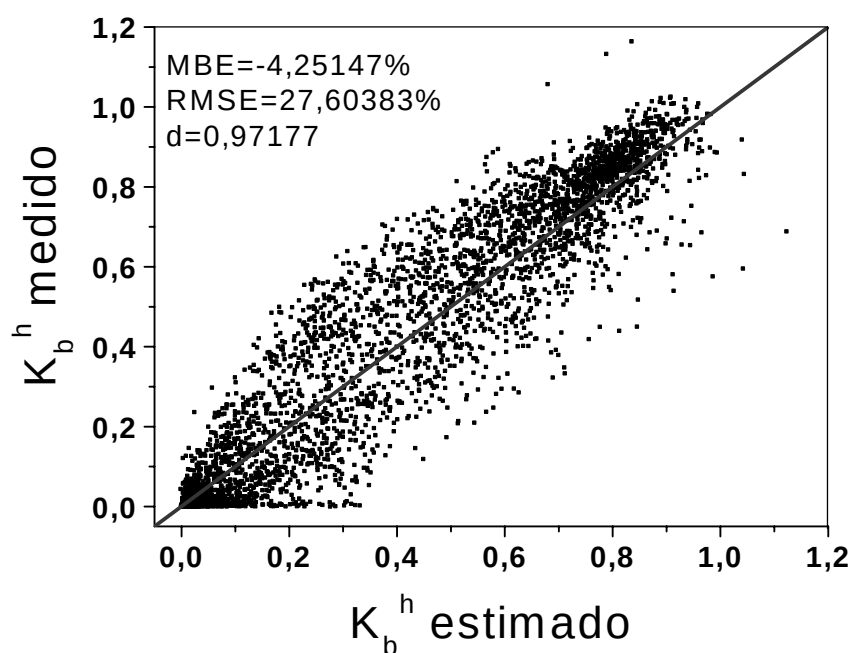


Figura 20. Correlações entre valores estimados K_b^h e medidos K_b^h e a reta (1:1).

O indicativo MBE mostra que a equação (17) em geral subestima as medidas em 4,25%, o RMSE mostra que o espalhamento é de 27,60%, e que o índice de

ajustamento d é na ordem de 0,972 (na escala de 0 a 1). Os resultados são próximos aos obtidos pelos autores Lam & Li (1996) (MBE entre -0,36% e 6,13%; RMSE entre 7,76% e 20,7%); Olmo et al., (1996) (MBE entre -1,4% e 13,2%; RMSE entre 27,2% e 26,6%); Batlles et al., (2000) (MBE entre 0 e -9%; e RMSE entre 20 e 22%) e Lopez et al., (2000) (MBE entre -0,8% e -23,9%; RMSE entre 16,9 e 31%).

A Figura 21 mostra as correlações entre $(K_T^h)_i$ e $(\bar{K}_b^h)$ e seus respectivos desvios $(\delta\bar{K}_b^h)$, para os meses de janeiro (fig.21a), fevereiro (fig.21b), março (fig.21c), abril (fig.21d), maio (fig.21e) e junho (fig.21f).

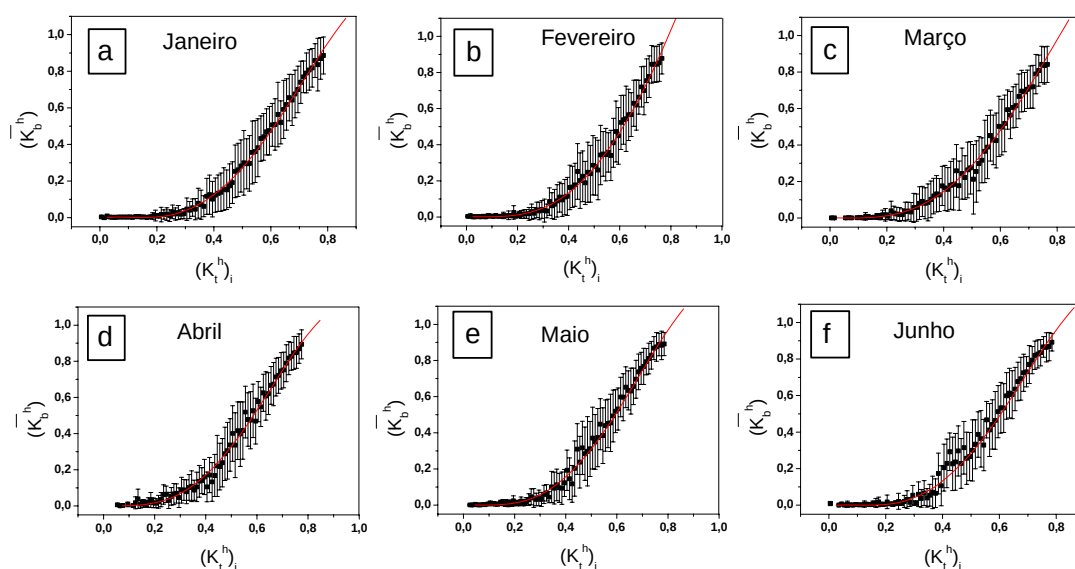


Figura 21. Correlações entre $(K_T^h)_i$ e $(\bar{K}_b^h)$ e seus respectivos desvios $(\delta\bar{K}_b^h)$, para os meses de janeiro (fig. 21a), fevereiro (fig. 21b), março (fig. 21c), abril (fig.21d), maio (fig. 21e) e junho (fig. 21f).

A Figura 22 mostra as correlações entre $(K_T^h)_i$ e $(\bar{K}_b^h)$ e seus respectivos desvios $(\delta\bar{K}_b^h)$, para os meses de julho (fig.22a), agosto (fig.22b), setembro (fig.22c), outubro (fig.22d), novembro (fig.22e) e dezembro (fig.22f).

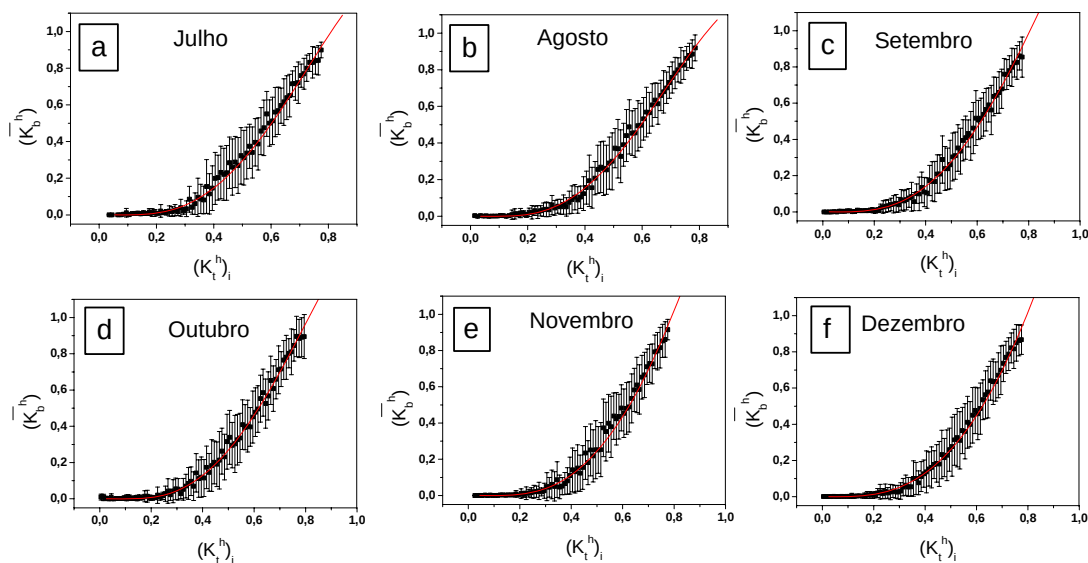


Figura 22. Correlações entre $(K_t^h)_i$ e $(\bar{K}_b^h)$ e seus respectivos desvios $(\delta \bar{K}_b^h)$, para os meses de julho (fig.22a), agosto (fig.22b), setembro (fig.22c), outubro (fig.22d), novembro (fig.22e) e dezembro (fig.22f).

As Figuras 21 e 22 também geraram equações de quarto grau, para estimativa de $(\bar{K}_b^h)$ em função de $(K_t^h)_i$. As correlações mensais ajustadas seguiram a mesma tendência da equação (17), com coeficientes ajustados a sazonalidade de cada mês.

As equações mensais de quarto grau, para estimativa de $(K_t^h)_i$ em função de $(\bar{K}_b^h)$, ajustadas através de regressão polinomial, das Figuras 21 e 22 estão apresentadas na Tabela 6.

Os coeficientes de determinação para equações de estimativas mensais, também elevados (próximo de 1), mostram que as frações médias mensais estão bem correlacionadas com $(K_t^h)_i$ no intervalo de 0 a 1. Nos meses de janeiro, fevereiro, março, abril, maio, julho, agosto, outubro, novembro e dezembro os coeficientes de

determinação são aproximadamente iguais entre si e superiores a 0,99, enquanto que, nos meses de junho e setembro, são superiores a 0,98.

Tabela 6. Coeficientes de regressão dos modelos de estimativa da fração $(\bar{K}_b^h)$ direta horária média do intervalo centesimal em função de $(K_t^h)_i$ e coeficientes de determinação.

Mês	$(\bar{K}_b^h) = \sum_{j=0}^4 a_j ((K_t^h)_i)^j$					
	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	R^2
Janeiro	-2,6600E-03	0,21382	-2,50131	9,13061	-5,58501	0,99159
Fevereiro	3,6776E-04	0,05691	-0,88976	4,85148	-2,26449	0,99289
Março	-2,3642E-04	0,03816	-0,84633	5,39948	-3,1158	0,99098
Abril	-5,5300E-03	0,16049	-1,64505	8,06515	-5,48875	0,99343
Maio	-1,5200E-03	0,10406	-1,54151	7,67706	-5,02116	0,99097
Junho	-5,2400E-03	0,22826	-2,59404	9,61407	-6,05255	0,98769
Julho	-2,1500E-03	0,10670	-1,47945	7,10917	-4,39518	0,99302
Agosto	-1,3500E-03	0,09089	-1,51256	7,66394	-5,05295	0,9917
Setembro	-2,1907E-04	0,02622	-0,65491	4,63117	-2,41419	0,98878
Outubro	-1,6800E-03	0,08737	-1,31871	6,17511	-3,46859	0,99252
Novembro	-1,3800E-03	0,07990	-1,08354	4,79034	-1,96124	0,99287
Dezembro	9,6607E-05	0,01193	-0,36138	3,30404	-1,10759	0,99415

A Tabela 7 mostra os resultados da validação das equações mensais através dos indicadores estatísticos MBE, RMSE e d.

Segundo o indicativo MBE, a equação mensal subestimou as medidas em todos os meses, com exceção a janeiro, fevereiro e setembro, nos quais ocorreu superestimativa. Em termos absolutos, a menor sub/superestimativa ocorreu em setembro (2,45), e a maior em junho (-13,16%). Comparando-se com os resultados da equação 17 somente as equações de maio, setembro e outubro foram melhores pontuadas no indicativo MBE, sendo assim mais recomendadas que a anual na estimativa de K_b^h .

O indicativo estatístico RMSE mostra que o espalhamento das equações mensais variou entre 17,87% (em abril) a 53,27% (em fevereiro), e que as equações mensais apresentam melhor desempenho que a anual na maioria dos meses. As equações dos meses de março, abril, junho, julho, agosto, setembro e outubro são mais recomendadas para a estimativa de K_b^h do que a equação anual.

Tabela 7. Resultados da validação das equações mensais horárias

Mês	MBE(%)	RMSE(%)	d
Janeiro	6,75	45,37	0,96
Fevereiro	11,70	53,27	0,96
Março	-10,57	24,42	0,96
Abril	-8,61	17,85	0,97
Maio	-2,46	30,85	0,97
Junho	-13,16	22,69	0,96
Julho	-7,22	24,05	0,98
Agosto	-7,12	22,30	0,98
Setembro	2,45	22,82	0,98
Outubro	-4,03	23,34	0,98
Novembro	-6,04	36,89	0,97
Dezembro	-4,68	32,26	0,97
Anual	-4,25	27,60	0,97

Com relação ao índice de ajustamento d, de Willmott, todas as equações apresentaram elevado ajustamento, entre 0,96 e 0,98 (na escala de 0 a 1). As equações para os meses de julho, agosto, setembro e outubro apresentaram melhor ajustamento que a anual neste indicativo.

4.2.1.2 Modelo Diário

A Figura 23 mostra a correlação entre K_b^d e K_T^d para 2327 dias e a curva polinomial ajustada através de regressão.

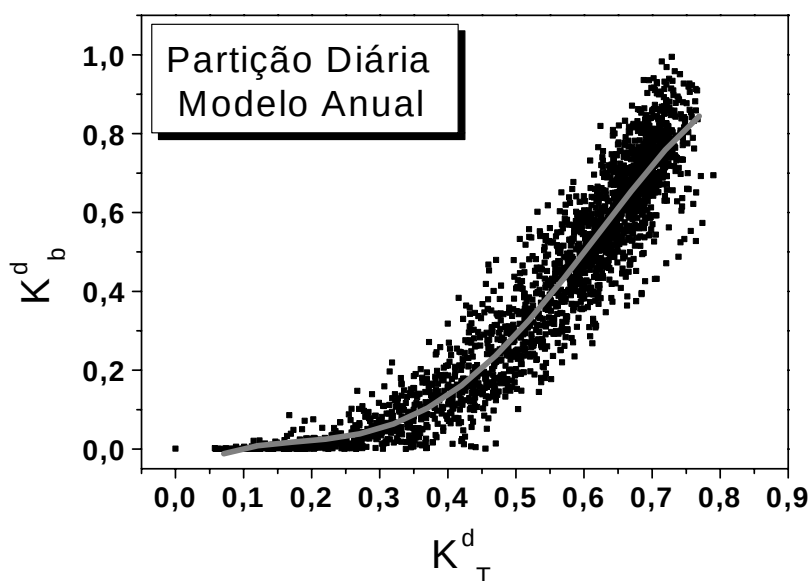


Figura 23. Correlação entre K_b^d e K_T^d , e curva polinomial de quarta ordem ajustada através de 2327 dias.

Utilizando a classificação de cobertura de céu empregada na Figura 23, obtiveram-se 127 dias extremamente nebulosos ($K_T^d \leq 0,20$); 250 dias nebulosos tendendo a parcialmente nublados ($0,20 < K_T^d \leq 0,35$); 596 dias parcialmente nublados com dominância de céu difuso ($0,35 < K_T^d \leq 0,55$); 602 dias parcialmente nublados com dominância de céu aberto ($0,55 < K_T^d \leq 0,65$); e 752 dias com cobertura de céu sem nuvens ($K_T^d > 0,65$).

A fração média de K_T^d sobre 2327 dias é igual a 0,54, indicando uma condição de cobertura de céu no intervalo III. A soma das frações condições IV e V juntas representam cerca de 58,2% das observações, enquanto que as demais condições somadas (I+II+III) representam somente 48,2% das observações. Esses percentuais são muito importantes em termos de aplicabilidade da energia solar, pois indica que a localidade em questão apresenta elevada transmissividade, e conseqüente disponibilidade de radiação direta em mais de 58% dos dias.

A transmissividade da radiação direta dentro de cada uma das 5 condições varia da seguinte forma: no intervalo I, $\overline{K_b^d}=0,0075$, no intervalo II, $\overline{K_b^d}=0,0497$, no intervalo III, $\overline{K_b^d}=0,23207$, no intervalo IV, $\overline{K_b^d}=0,51119$, e $\overline{K_b^d}=0,70706$ no intervalo V. No intervalo IV, o valor médio da transmitância da radiação direta ultrapassa os 51%, e no intervalo V, 70%. A $\overline{K_b^d}$ somente se torna representativa a partir do intervalo III, pois abaixo disso a transmitância da radiação direta é inferior a 5%.

A equação de quarto grau ajustada através de regressão polinomial, com coeficiente de determinação $R^2=0,9060$, é dada por:

$$K_b^d = -0,0803 + 1,44835(K_t^d) - 8,07268(K_t^d)^2 + 19,31456(K_t^d)^3 - 12,00769(K_t^d)^4 \quad (18)$$

A elevada correlação próxima de 91% mostra que as variações de K_b^d estão bem correlacionadas com as variações de K_T^d . Em Marrocos, Rerhrhaye et al., (1995) obtiveram R^2 de 0,883 na primavera/outono e de 0,953 no inverno.

A Figura 24 mostra a validação da equação (18) por meio da correlação entre a estimativa e medida de K_b^d , composta por 334 dias, e os indicadores estatísticos MBE, RMSE e d. A reta que divide o quadrante é a reta ideal da comparação (1:1). A Figura 24 repete o que foi observado na Figura 20. Ocorreu subestimativa da medida, especialmente para $K_T^d > 0,65$. O espalhamento da medida diária é menor que o da horária.

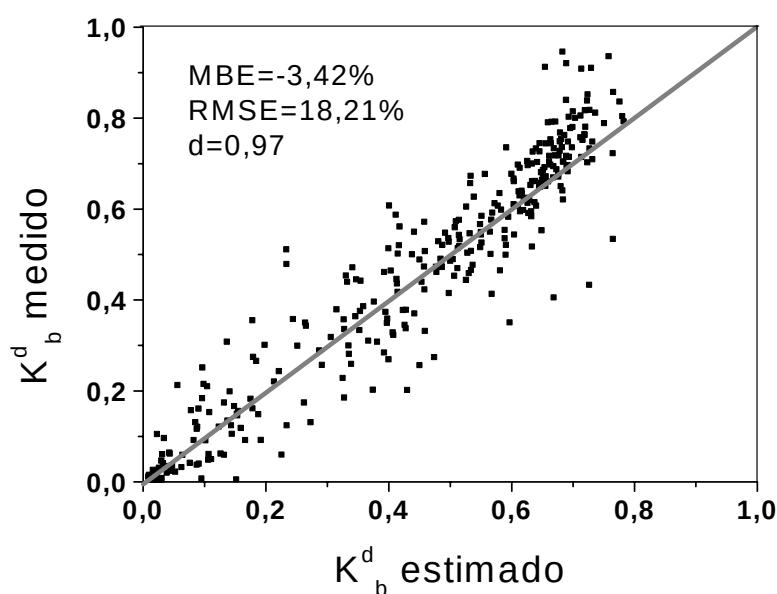


Figura 24. Correlação entre os valores estimados e medidos de K_b^d composta por 334 dias de 2002.

Os indicadores estatísticos MBE, RMSE e d obtidos mostram que a equação (18) em geral subestima as medidas em 3,42%, causa espalhamento de 18,21%, e apresenta um índice de ajustamento d igual a 0,97.

As Figuras 25 e 26 mostram as correlações obtidas entre K_b^d e K_T^d para todos os meses do ano de 2002.

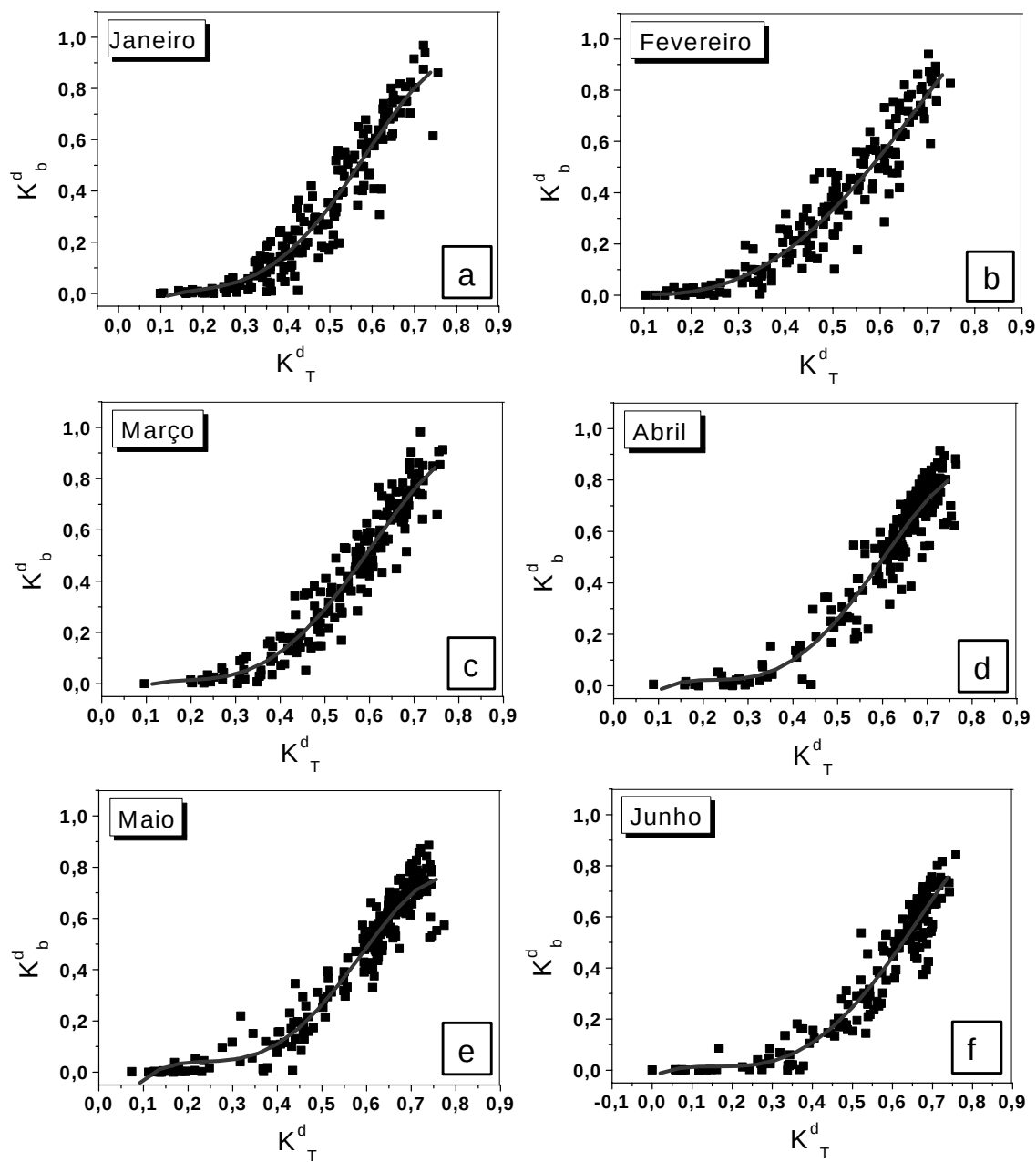


Figura 25. Correlações entre K_b^d e K_T^d para os meses de janeiro a junho de 2002.

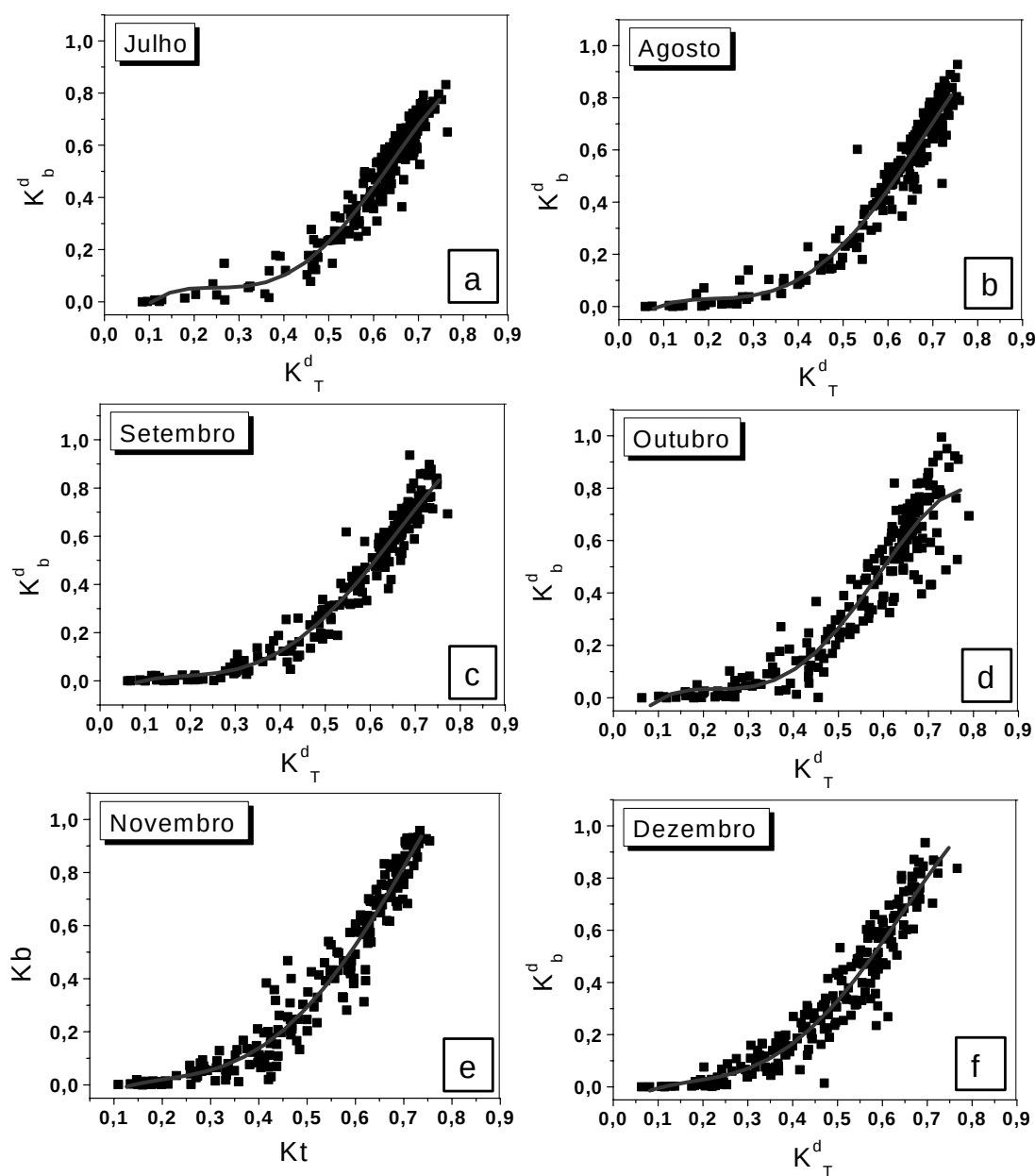


Figura 26. Correlações entre K_b^d e K_T^d para os meses de julho a dezembro de 2002.

As equações mensais de quarto grau, para estimativa de K_b^d em função de K_T^d , ajustadas através de regressão polinomial, das Figuras 25 e 26 estão apresentadas na tabela 8:

Tabela 8. Coeficientes de regressão dos modelos de estimativa da fração K_b^d direta diária em função de K_b^d e coeficientes de determinação.

Mês	$K_b^d = \sum_{i=0}^4 a_i (K_t^d)^i$					R^2
	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	
Janeiro	-0,1494	2,2383	-11,8199	27,4137	-17,6023	0,90807
Fevereiro	0,0151	-0,1139	-0,5550	6,2249	-4,2294	0,9056
Março	-0,1254	2,1036	-11,6769	26,5517	-16,5517	0,91963
Abril	-0,232	3,6103	-18,2536	37,2437	-22,4991	0,91025
Maio	-0,3211	4,7794	-22,7193	44,3172	-26,6462	0,92696
Junho	-0,0255	0,8010	-5,4971	14,2365	-8,5621	0,91840
Julho	-0,2566	4,0496	-18,7689	35,1129	-19,7734	0,93390
Agosto	-0,111	2,0036	-10,3008	21,3226	-11,8871	0,94345
Setembro	-0,0836	1,4943	-8,0688	18,3739	-10,8215	0,95372
Outubro	-0,2347	3,8442	-19,5061	39,7569	-24,2327	0,88914
Novembro	-0,1462	1,9648	-8,9758	18,5317	-9,8567	0,94435
Dezembro	-0,0935	1,4558	-7,3462	17,5510	-10,5890	0,91610

Os coeficientes de determinação (R^2) das equações mensais de janeiro, fevereiro, março, abril, maio, junho e dezembro são da mesma ordem de grandeza da equação (18). Os meses de setembro, novembro, agosto e julho apresentam os melhores ajustes, com R^2 superior a 0,95, enquanto que o mês de outubro possui o pior ajuste com R^2 inferior a 0,90.

A Tabela 9 mostra a validação das equações mensais. No geral, ocorre subestimativa, com exceção às equações para os meses de janeiro, fevereiro, setembro e novembro, os quais superestimam a medida.

Em termos absolutos, as equações sub/superestimaram com MBE variando de 2,25 a 8,73%. Somente para os meses de outubro e novembro, as equações mensais apresentaram os melhores resultados que a equação anual.

Tabela 9. Resultados da validação das equações mensais diárias.

Mês	MBE(%)	RMSE(%)	d
Janeiro	6,72	26,74	0,971
Fevereiro	5,45	30,98	0,979
Março	-6,62	12,06	0,969
Abril	-5,33	15,79	0,855
Maio	-4,92	15,71	0,983
Junho	-8,73	12,64	0,861
Julho	-4,58	10,54	0,992
Agosto	-5,34	17,00	0,969
Setembro	4,35	14,97	0,988
Outubro	-3,06	13,47	0,974
Novembro	2,25	34,29	0,954
Dezembro	-5,16	24,23	0,965
Anual	-3,42	18,21	0,973

O indicativo estatístico RMSE mostra que as equações mensais causam espalhamento entre 10,54% e 30,98%. O maior espalhamento ocorreu nos meses mais nebulosos, que vão de novembro a fevereiro, onde o valor de RMSE excedeu o valor da equação anual (18,2%). O menor espalhamento ocorreu em julho (10,2%), devido à baixa concentração de vapor de água na atmosfera, bem como de nuvens no período do inverno local. Sendo assim, os meses de março a outubro são mais indicados à estimativa de K_b^d , pois apresentaram RMSE inferiores a equação anual (18,2%). O índice de ajustamento das equações mensais foi elevado, pois em 10 meses excedeu 0,95, chegando a atingir 0,99 em julho e setembro. Estes valores são considerados bons pela literatura (Lam & Li, 1996).

4.2.1.3 Modelo Mensal

A Figura 27 mostra a correlação entre K_b^m e K_t^m , e a reta ajustada por meio de regressão linear simples para 83 pontos experimentais. Diferentemente das partições horária e diária, há dependência linear entre as variáveis K_b^m e K_t^m .

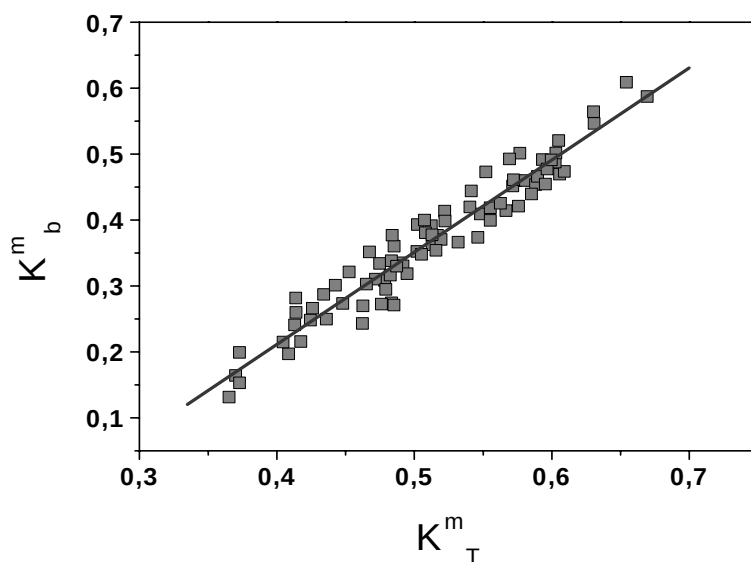


Figura 27. Correlação entre K_b^m e K_t^m , e a reta ajustada por meio de regressão linear

As condições de cobertura de céu I ($K_T^m \leq 0,2$) e II ($0,2 < K_T^m \leq 0,35$) mostraram não ter muita representatividade na partição mensal, já que os valores de K_t^m variaram entre 0,36532 e 0,66937, com $\overline{K_t^m} = 0,51395$, enquanto que os valores de K_b^m variaram entre 0,13141 e 0,60869, com $\overline{K_b^m} = 0,37$.

A equação linear para a estimativa de K_b^m em função de K_t^m , ajustada através de regressão linear simples, é dada por:

$$K_b^m = -0,34786 + 1,39829K_T^m \quad (19)$$

A equação (19) apresenta elevado coeficiente de determinação ($R^2=0,9660$), mostrando a qualidade do ajuste, indicando que 96,6% da variação de K_b^m é explicada por K_T^m .

A validação da equação (19) está apresentada na Figura 28, a qual mostra a correlação entre a estimado e medido de K_b^m e os indicadores estatísticos MBE, RMSE e d. Os pontos experimentais tenderam a se concentrar mais no quadrante de K_b^m medido, confirmando os valores de MBE, quanto a subestimativa da medida. No mês de fevereiro de 2002 ocorreram os menores valores de K_b^m (K_b^m medido=0,19 e K_b^m estimado=0,23), enquanto que, para os meses de março (K_b^m medido=0,51 e K_b^m estimado=0,62), abril (K_b^m medido=0,55 e K_b^m estimado=0,62), e junho (K_b^m medido=0,55 e K_b^m estimado=0,58), ocorreram os maiores valores.

Os indicadores estatísticos mostram que a equação superestima em 3,21% (MBE), causa espalhamento de 14,80% (RMSE) e ajustamento d igual a 0,9149. O resultado pode ser considerado bom comparado aos indicadores estatísticos da validação de equações de estimativa mensal de outras radiações, como por exemplo a difusa, obtidas nos trabalhos de Liu & Jordan (1960), Hay (1979) e Iqbal (1979a).

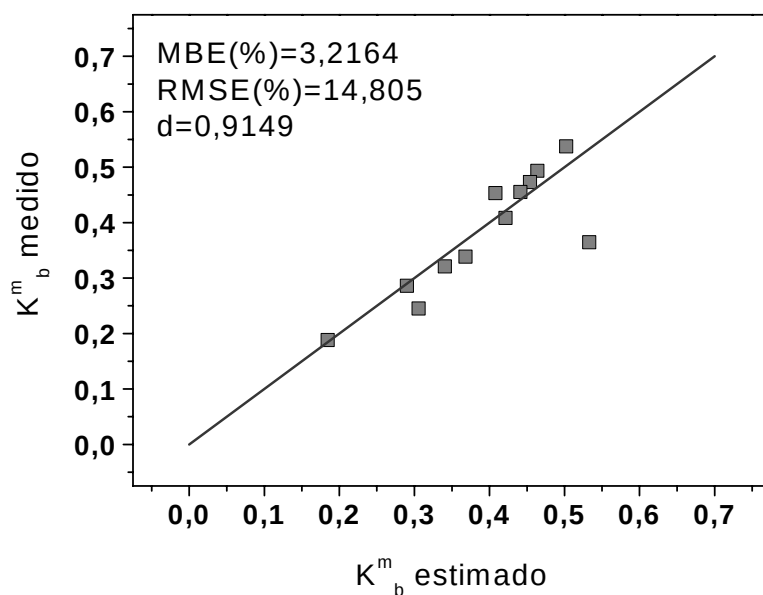


Figura 28. Correlação entre os valores estimados e medidos de K_b^m .

4.2.2 Modelo de Estimativa Estatístico de Angström

4.2.2.1 Modelo Diário

A Figura 29 (a) mostra a relação entre a fração da radiação direta na incidência K_b^d e a razão de insolação $(n/N)^d$ para 2175 dias. Para uma variação de $(n/N)^d$ entre 0 a 0,98, a fração K_b^d variou de 0 a 0,86. A variação de K_b^d para cada unidade de $(n/N)^d$ é bastante elevada no intervalo de 0 a 1, como mostra o exemplo: para $(n/N)^d=0,105$ (em 17 dias), a fração K_b^d variou de 0,024 á 0,085; para $(n/N)^d=0,205$ (em 10 dias), K_b^d variou de 0,06 á 1,74; para $(n/N)^d=0,305$ (em 17 dias), K_b^d variou de

0,08 á 0,282, e assim por diante até $(n/N)^d = 0,905$, onde em 51 dias K_b^d variou de 0,51 á 0,78.

Assim, a distribuição das medidas de K_b^d , para cada unidade de $(n/N)^d$, pode ser substituída pelo valor médio dos intervalos centesimais $(\bar{K}_b^d)$, com os desvios das médias, como mostra a Figura 29 (b).

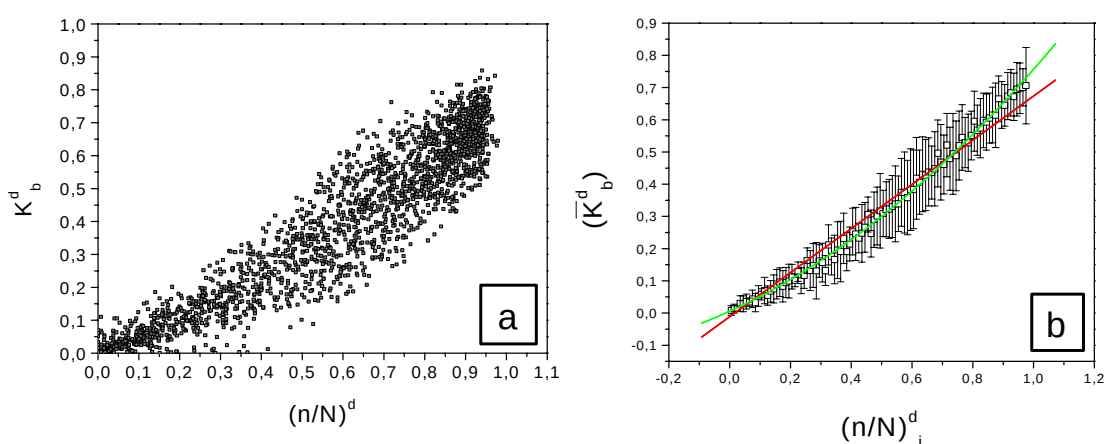


Figura 29. (a) Correlação entre a fração da radiação direta na incidência K_b^d e a razão de insolação $(n/N)^d$ diários, e (b) Correlação entre $(\bar{K}_b^d)$ em função de intervalos centesimais de $(n/N)_i^d$

Era esperado que a distribuição dos pontos da correlação entre $(\bar{K}_b^d)$ e $(n/N)_i^d$ tivesse uma evolução linear, em todo o intervalo de variação de $(n/N)_i^d$, visto que as duas variáveis estão muito associadas e a transmissão da radiação direta na incidência é proporcional ao tempo de exposição do sol na atmosfera. No entanto, a evolução da fração média de $(\bar{K}_b^d)$ em função de $(n/N)_i^d$ sugere também uma dependência de segundo grau, conforme mostrada na Figura 29(b).

As equações de estimativas lineares (reta vermelha da Fig. 29(b)) e polinomial (curva verde da Fig 29(b)), geradas por meio de regressão polinomial e linear, com seus respectivos coeficientes de determinação são apresentadas a seguir:

$$(K_b^d) = 0,00519 + 0,42778(n/N)_i^d + [0,32368(n/N)_i^d]^2 \quad \text{com} \quad R^2=0,9962 \quad (20)$$

$$(K_b^d) = -0,0115 + 0,685(n/N)_i^d \quad \text{com} \quad R^2=0,9815 \quad (21)$$

Os elevados coeficientes de determinação, próximos de 1, mostram que a fração média K_b^d está bem correlacionada com $(n/N)_i^d$ no intervalo de variação de 0 a 1, com melhor resultado para o ajuste polinomial. A função de estimativa polinomial praticamente coincidiu com a evolução média de $(\bar{K}_b^d)$ em todo intervalo de variação de $(n/N)_i^d$. A função de estimativa linear tende a subestimar a medida K_b^d quando $(n/N)_i^d$ situa-se acima de 0,65 e superestimar K_b^d quando $(n/N)_i^d$ situa-se abaixo de 0,65.

A Figura 30 mostra a validação das equações (20) e (21), na base de dados de 2002. No eixo das ordenadas é apresentada K_b^d medida e no eixo das abscissas a estimativa de K_b^d , ambas no ano de 2002. A reta de 45° representa a relação ideal entre a medida e a estimativa.

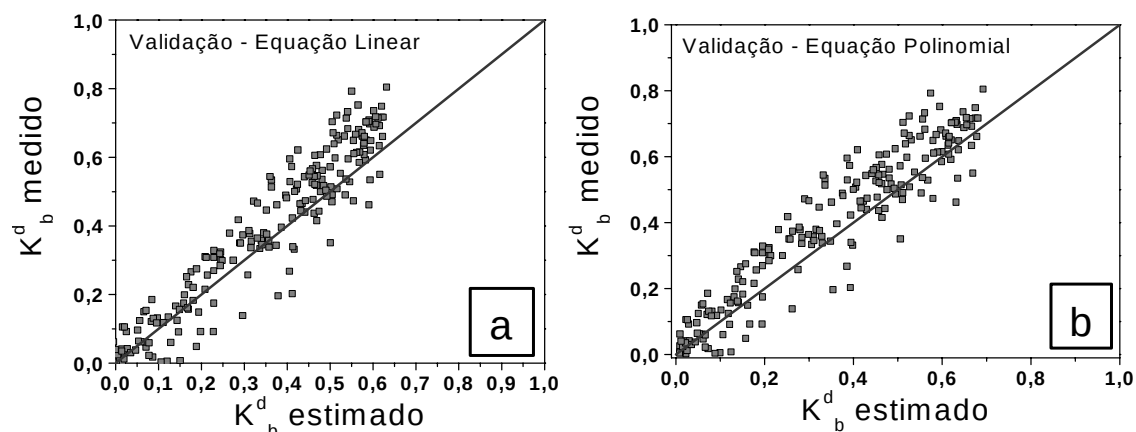


Figura 30. (a) Correlação entre K_b^d estimado pela equação (20) e K_b^d medido; (b) Correlação entre K_b^d estimado pela equação (21) e K_b^d medido.

Os indicadores estatísticos da validação das equações (20) e (21) (Tabela 10) mostram que o desempenho é equivalente, pois as duas equações subestimam as medidas em torno de 11,5% (MBE), e espalhamento na ordem de 22,70%. O índice de ajustamento “d” na validação das duas equações foi elevado, na ordem de 0,96. O resultado para os indicadores estatísticos é comparável aos obtidos por Louche et al., (1991), Maduekwe & Chendo (1995) e Tiris et al., (1995).

Tabela 10. Resultados da validação das Equações diárias (20) e (21).

Modelo	MBE(%)	RMSE(%)	d
Linear (Eq. 20)	-11,18	22,71	0,9572
Polinomial (Eq. 21)	-11,81	22,78	0,9599

4.2.2.2 Modelo Mensal

A Figura 31 mostra a relação entre a fração K_b^m mensal e razão de insolação média mensal $(n/N)^m$ para um total de 83 pontos.

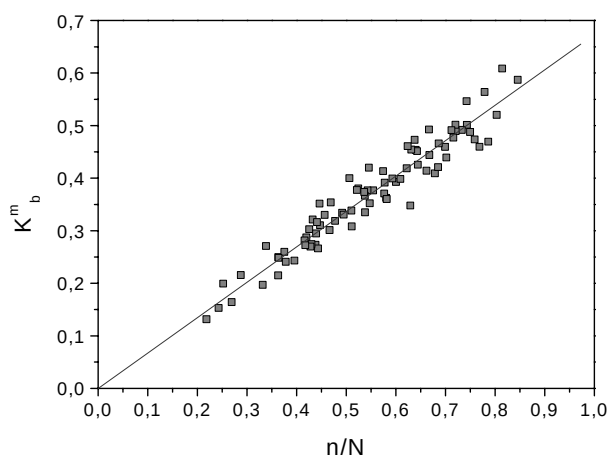


Figura 31. Correlação entre K_b^m e $(n/N)^m$

A equação de estimativa linear gerada por regressão, bem como o coeficiente de determinação é apresentado a seguir:

$$K_b^m = 0,006 + 0,663(n/N)^m \quad \text{com} \quad R^2 = 0,9259 \quad (22)$$

O coeficiente de determinação mostra que a fração K_b^m mensal e a razão de insolação média mensal $(n/N)^m$ estão bem correlacionadas. O coeficiente linear igual a 0,006 mostra que a transmissividade mínima é praticamente igual a zero, ou seja, quando o número de horas de brilho solar (n) tende a zero, a transmissividade mínima tende a 0,6%. Quando o (n) tende a 1, ou seja (n) tende a (N), a transmissividade é

máxima e igual à soma dos dois coeficientes (linear e angular) da equação, $K_b^m = 0,006 + 0,663(n/N)^m = 0,67$. O percentual de 67,0% expressa a transmissividade máxima da radiação direta na incidência média mensal para Botucatu.

A Figura 32 mostra a validação da equação (22), para a base de dados de 2002, não usada na elaboração das equações de estimativa e os indicadores estatísticos MBE, RMSE e d. No eixo das ordenadas é apresentada K_b^m medida e no eixo das abscissas, a estimativa de K_b^m , ambas para o ano de 2002. A reta de 45° representa a relação ideal entre a medida e a estimativa.

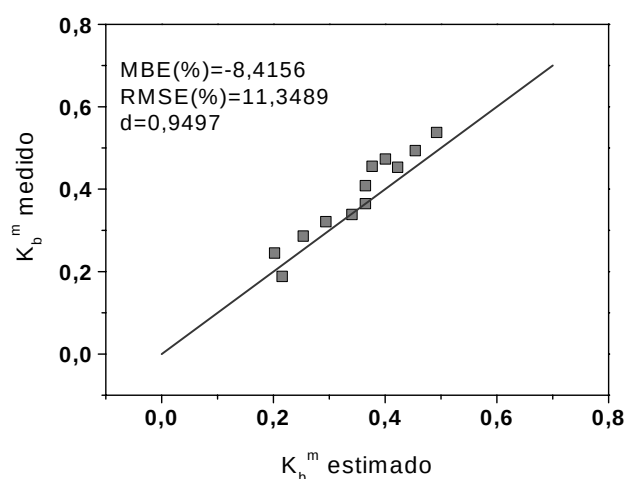


Figura 32. Correlação entre K_b^m estimado (equação 22) e K_b^m medido.

Os indicadores estatísticos mostram que a equação (22) subestima a medida em 8,42%, com espalhamento de 11,35%, e apresenta um índice de ajustamento de 0,95. Os resultados estatísticos são considerados bons, e muito próximos de Louche et al., (1991) e Maduekwe & Chendo (1995).

4.2.3 Modelo Paramétrico de Linke

Para caracterizar a turbidez atmosférica de Botucatu, segundo a metodologia proposta por Linke, a Figura 33 mostra a frequência de ocorrência percentual do fator de turbidez de Linke em atmosferas secas e limpas (ASL). O pico da distribuição ocorreu em 3ASL, representando cerca de 12,8% das observações. Menos de 1% das observações ocorreram quando TL foi superior de 5,5, sendo que aproximadamente 99% das ocorrências de TL encontram-se no intervalo entre 2,0 e 6,0.

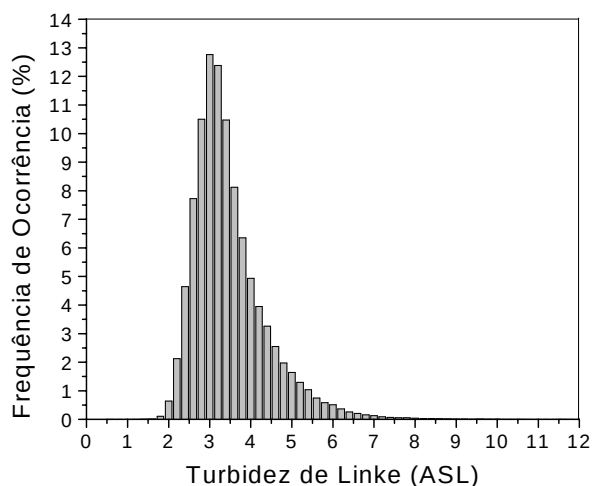


Figura 33. Frequência de Ocorrência do Fator de Turbidez de Linke.

A frequência acumulativa de distribuição do fator de turbidez de Linke está apresentada na Figura 34, e serve como indicativo da porcentagem de observações (instantâneas de dias de céu sem nuvens) em que um dado nível de turbidez é atingido. Cerca de 90% das observações ocorrem abaixo de 2,5. O valor $TL=3,2$ é o divisor da curva de frequência, pois 50% das observações encontram-se abaixo e acima deste valor.

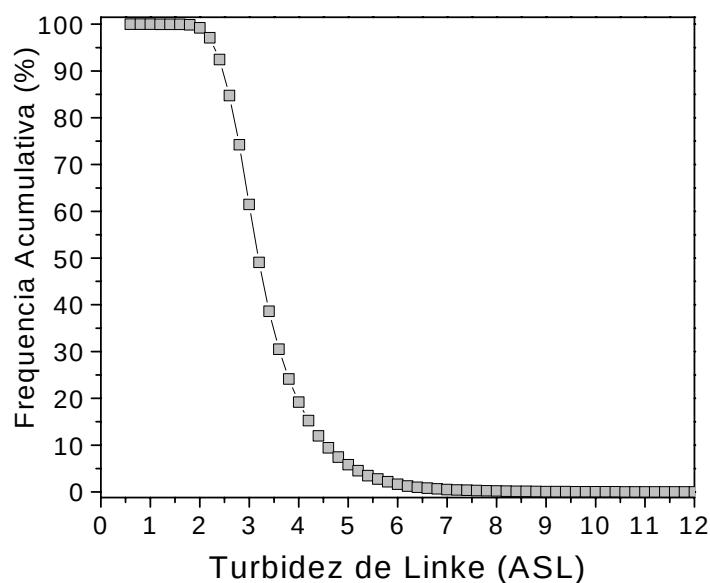


Figura 34. Frequência Acumulativa de Distribuição do Fator de Turbidez de Linke.

Estes valores são diferentes dos observados por Li & Lam (2002) em Hong Kong, onde 50% das observações de TL encontram-se entre 4,3 e 5,3ASL, indicando que a cobertura atmosférica é de túrbida a clara. A cobertura da atmosfera de Botucatu mostra ser bem mais limpa que de Hong Kong.

A Figura 35 mostra a evolução anual das médias mensais de TL e seus respectivos desvios. Os valores de TL variam de mês para mês, com uma periodicidade característica, onde os maiores valores de TL ocorrem na primavera e verão (maior nebulosidade), e os menores no outono e inverno (menor nebulosidade). A Tabela 11 mostra os valores médios mensais de TL e respectivos desvios para os meses de janeiro a dezembro.

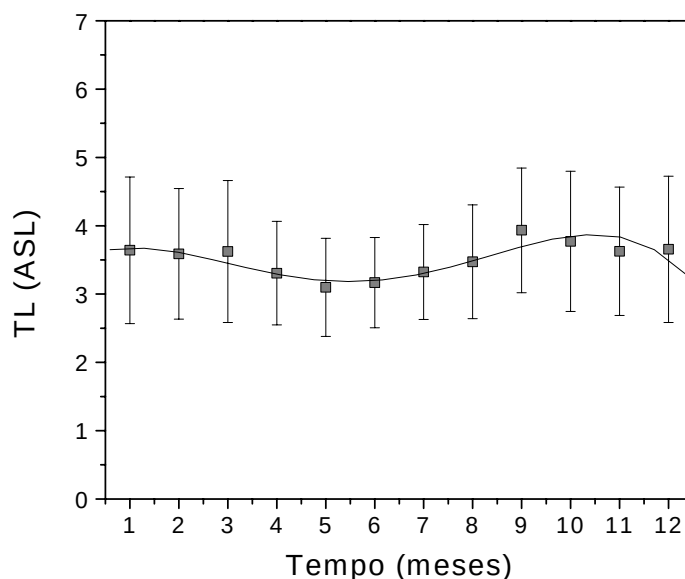


Figura 35. Fator de Turbidez de Linke Médio Mensal em função do tempo em meses.

Os meses de abril a agosto são os que apresentaram os menores valores de TL, devido à maior estabilidade atmosférica, enquanto que os demais meses apresentam cobertura de céu mais instável, com maior ocorrência de entrada e saída de nuvens, resultando em maior turbidez, e conseqüentemente maiores desvios. Os valores médios mensais de TL são de $3,1 \pm 0,7$ em maio a $3,9 \pm 0,7$ em setembro, e na média geral TL foi igual a 3,5.

Este resultado é aproximadamente igual ao obtido por Pedrós et al. (1999) em Valência, Espanha (TL entre 2,9 a 4,7); Hussain et al (2000) em 3 regiões Bangladesh (TL entre 3,46ASL a 4,83ASL, com média de 4,0ASL); e menor que os obtido por Shaltout et al., (2001) em EL-Menia, região poluída do Egito (TL entre 2,01 e 5,86ASL); Li & Lam, (2002) em Hong Kong, (TL entre 3,7 a 5,26ASL), e Diabaté et al., (2003) na África (TL=3,5ASL).

Segundo Becker (2001), valores de TL entre 4 e 6 ASL indicam que a região é úmida, enquanto que acima de 6 ASL é poluída. Já entre 1,8 a 2,7 indica áreas montanhosas.

A equação polinomial de quarta ordem que melhor se ajusta à variação de TL em função do tempo, em meses, é dada por:

$$TL = 3,52846 + 0,30153T - 0,18083T^2 + 0,02749T^3 - 0,00121T^4 \quad (23)$$

O desenvolvimento desta equação busca uma facilitação no cálculo do Modelo de Linke, pois visa à determinação de TL em função e um parâmetro simples (o tempo em meses), ao invés de utilizar parâmetros mais complexos da metodologia de Linke. A equação apresenta um coeficiente de determinação (R^2) de 0,8122, indicando que cerca de 81,2% da variação de TL é explicada pelo tempo (em meses).

A estimativa da radiação direta na incidência, calculada mensalmente (valores médios mensais de TL) pela expressão de Li & Lam (2002):

$I_b = 1367E_0 \exp(-TL \delta_R m_a)$ estão apresentados na tabela abaixo.

Tabela 11. Valores médios mensais de TL e respectivos desvios.

Mês	TL	Desvios
Janeiro	3,64	1,07
Fevereiro	3,59	0,96
Março	3,62	1,04
Abril	3,31	0,76
Maio	3,10	0,72
Junho	3,17	0,66
Julho	3,32	0,69
Agosto	3,47	0,83
Setembro	3,93	0,91
Outubro	3,77	1,03
Novembro	3,63	0,94
Dezembro	3,65	1,07

A comparação entre a estimativa e a medida instantânea da radiação direta na incidência para os meses é apresentada na tabela abaixo.

Tabela 12. Resultados da Validação do Modelo de Linke nos meses do ano de 2002

Mês	MBE(%)	RMSE(%)	d
Janeiro	-4,38	13,87	0,83
Fevereiro	-1,00	14,18	0,86
Março	-5,26	13,44	0,86
Abril	1,32	9,91	0,93
Maio	-2,67	12,15	0,91
Junho	2,00	8,98	0,94
Julho	-5,20	14,52	0,87
Agosto	2,53	9,93	0,92
Setembro	-1,75	15,20	0,79
Outubro	11,39	14,66	0,77
Novembro	-4,35	15,57	0,84
Dezembro	-5,84	12,88	0,86

Em geral, o modelo de Linke subestima as medidas nos meses de janeiro (4,38%), fevereiro (1,0%), março (5,26%), maio (2,67%), julho (5,20%), setembro (1,75%), novembro (4,35%) e dezembro (5,84%), e superestima as medidas nos meses de abril (1,32%), junho (2,0%), agosto (2,53%) e outubro (11,39%).

Segundo RMSE, o espalhamento variou entre 8,98% (junho) e 15,57% (novembro). Os meses de abril (9,91%), junho (8,98%) e agosto (9,93%) são os que ocorreram os menores espalhamentos, enquanto que os meses de setembro (15,20%), outubro (14,66%) e novembro (15,57%) apresentam os maiores espalhamentos.

O índice de ajustamento (d) é de satisfatório a bom, pois na maioria dos meses é superior a 0,83, com exceção dos meses de setembro (0,79) e outubro (0,77), nos quais o índice é inferior. No geral, (d) variou entre 0,77 (outubro) e 0,94 (junho), sendo os meses de abril a agosto os que apresentam os melhores resultados.

A Figura 36 mostra a comparação entre a medida (base de dados de 2002) e estimada (modelo de Linke) da radiação direta (W/m^2) em função do tempo em horas, para os dias 25/06/2002 a 29/06/2002 (Figura 36a); e 10/10/2002 a 14/10/2002 (Figura 36b). O modelo de Linke apresenta os melhores resultados na Figura 36(a), enquanto na Figura 36(b) ocorrem os piores resultados dentro da base de dados da validação.

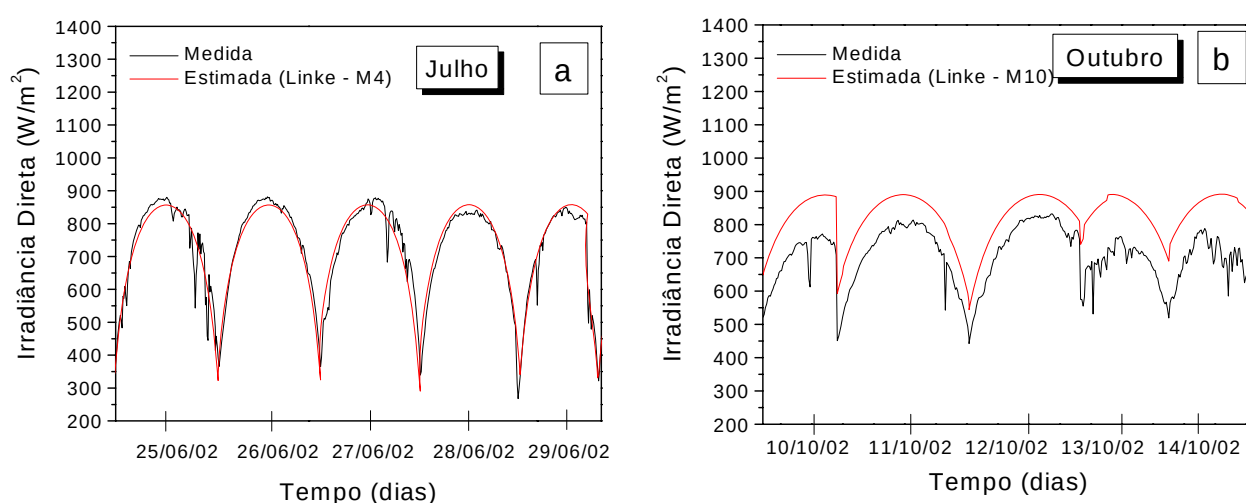


Figura 36. Radiação Direta Medida e Estimada para os meses de (a) Julho (dias 25/06/02 a 29/06/02); (b) Outubro (dias 10/10/02 a 14/10/02).

A tabela 13 mostra os indicativos MBE, RMSE e d da comparação entre medida e estimada para os dias 25 a 29 de julho de 2002 (fig. 18a), e de 10 a 14 de outubro de 2002 (fig. 18b).

A melhor estimativa do modelo de Linke fornece os indicativos estatísticos, MBE inferior a 4,0%, RMSE inferior a 7,5% e ajustamento acima de 0,98. O pior resultado, nos dias 10 a 15 de outubro, os indicativos estatísticos são : MBE de 10,0% até 23,0%, RMSE de 14,0% a 23,5%, e o ajustamento de 0,85 a 0,43

Tabela 13. Indicativos estatísticos MBE, RMSE e d para os dias de 25/06/2002 a 29/06/2002 e 10/10/2002 a 12/10/2002.

Data	MBE(%)	RMSE(%)	d
25/06/02	-0,86	6,50	0,97
26/06/02	-1,91	3,39	0,99
27/06/02	-0,95	7,26	0,96
28/06/02	3,68	5,19	0,98
29/06/02	1,76	5,91	0,98
10/10/02	18,67	19,03	0,56
11/10/02	14,44	14,82	0,77
12/10/02	10,32	10,56	0,85
13/10/02	22,69	23,11	0,43
14/10/02	22,39	23,21	0,38

No geral, o modelo estima a radiação direta diária dentro dos limites deste intervalo de variação, onde o melhor desempenho é estabelecido para os indicativos de junho e o pior para os indicativos de outubro.

5 CONCLUSÕES

Dos resultados discutidos sobre a evolução diurna da radiação direta na incidência média horária anual e mensal conclui-se que: A evolução diurna da radiação direta na incidência média horária anual varia anualmente e ocorre uma variação de 24% entre as evoluções mais e a menos energéticas em relação à evolução média dos 7 anos. A equação temporal ajustada à evolução diurna média horária anual, com elevado coeficiente de determinação, pode estimar a radiação direta horária com precisão e exatidão. A sazonalidade na estimativa foi constatada por meio da comparação dos meses de dezembro e junho, e mostrou uma tendência de ocorrer uma melhor estimativa no período de céu aberto (junho) do que no de céu parcialmente nublado (dezembro). Nas estações de verão e primavera, nas quais ocorre maior nebulosidade e concentração de vapor de água, a radiação direta na incidência na superfície terrestre é menor que a média anual, enquanto que nas estações do inverno e outono, onde ocorre baixa nebulosidade e

vapor de água, a radiação direta é maior que a média anual. As equações temporais mensais apresentam o mesmo tipo de função (polinomial de quarto grau) que a equação temporal anual. Os indicativos estatísticos da validação das equações mensais mostram que o desempenho é equivalente à equação anual.

Dos resultados discutidos sobre a evolução anual da radiação direta média mensal diária conclui-se que: A evolução anual apresentou variações singulares, dependentes das condições atmosféricas relacionadas à nebulosidade e precipitação para cada ano. A evolução anual média dos 7 anos foi proporcional à evolução da nebulosidade e inversamente proporcional à evolução da precipitação. A equação temporal anual, ajustada por meio da evolução média mensal dos 7 anos, apresentou coeficiente de determinação (R^2) na ordem de 0,75, indicando que a qualidade da correlação é regular (estatisticamente). A validação da equação temporal anual mostrou bom desempenho na estimativa segundo os indicativos estatísticos.

Dos resultados discutidos para as equações de estimativas horária, diária e mensal, segundo o modelo de Liu & Jordan, conclui-se que: A equação de estimativa horária anual (de quarto grau) ajustada por meio de regressão polinomial, expressa que $(\overline{K_b}^h)$ e $(K_T^h)_i$ estão muito bem correlacionadas nas partições horária e diária. Os indicativos estatísticos obtidos na validação da equação de estimativa horária mostram que o desempenho do modelo é positivo estatisticamente. As correlações horárias mensais entre $(\overline{K_b}^h)$ em função de $(K_T^h)_i$ seguiram a mesma tendência da correlação anual com coeficientes ajustados à sazonalidade de cada mês e geraram equações de quarto grau com coeficientes de determinação elevados e da mesma ordem de grandeza da correlação anual. Na validação, com base nos indicativos estatísticos, as

equações de estimativas mensais apresentaram melhor desempenho que a equação anual. Na partição mensal, diferentemente da horária e diária, houve dependência linear entre as variáveis K_b^m e K_t^m . A fração K_b^m pode ser estimada em função de K_t^m com elevado coeficiente de determinação. A validação da equação K_b^m mensal, mostra por meio dos indicadores estatísticos que ocorre superestimativa com pequeno espalhamento e elevado ajustamento entre a medida e a estimada.

Dos resultados discutidos para as equações de estimativas diária e mensal utilizando o modelo de Angström conclui-se que: A correlação entre a fração da radiação direta na incidência K_b^d e a razão de insolação $(n/N)^d$ diária permitiu a geração, por meio de regressão polinomial, de duas equações de estimativa: linear e polinomial, ambas com elevados coeficientes de determinação. Os indicadores estatísticos da validação das equações linear e polinomial mostram que o desempenho das duas funções é equivalente: subestimam as medidas com regular espalhamento e bom índice de ajustamento. A correlação entre a fração K_b^m mensal e razão de insolação médio mensal $(n/N)^m$ é linear, e por meio da equação de estimativa determinou-se as transmissividade mínima e máxima. Na validação, o modelo subestimou a medida com baixo nível de espalhamento e bom ajustamento.

Dos resultados discutidos das equações de estimativas utilizando o modelo de LINKE mensal conclui-se que: O fator de turbidez de Linke (TL) varia mensalmente, onde os maiores valores de TL ocorrem nos meses mais nebulosos (verão e primavera), e os menores nos meses de céu claro (outono e inverno). Os TL médios mensais são de $3,1 \pm 0,7$ em maio e $3,9 \pm 0,7$ em setembro, com média TL igual a 3,5. Na validação mês a mês, o modelo de Linke, constituído de 12 equações mensais,

subestimou ou superestimou as medidas com bom nível de espalhamento e ajustamento. Com base no desempenho dos três indicativos MBE, RMSE e d de Willmott, o modelo apresentou melhores resultados nos meses de céu aberto.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALADOS – ARBOLEDAS, L., OLMO, F.J., ALADOS, I., PÉREZ, M. Parametrics models to estimate photosynthetically active radiation in Spain. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.101, p.187-201, 2000.

ALADOS, I., OLMO, F. J., FOYO-MORENO, I., ALADOS-ARBOLEDAS, L. Estimation of photosynthetically active radiation under cloudy conditions. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.102, p.39-50, 2000.

ANGSTRÖM, A. K. Solar and terrestrial radiation. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**. v.50, 121, 1924.

BARTOLI, B., CUOMO, V., AMATO, U. Diffuse and beam components of daily global radiation in Genova and Macerata. **Solar Energy**, v.28, p.307-11, 1982.

BATTLES, F. J., OLMO, F. J., ALADOS-ARBOLEDAS, L. On shadowband correction methods for diffuse irradiance measurements. **Solar Energy**, v.54, n.2, p.105-14, 1995.

- BATTLES, F.J., RUBIO, M.A., TOVAR, J., OLMO, F.J., ALADOS-ARBOLEDAS, L. Empirical modeling of hourly direct irradiance by means of hourly global irradiance. **Energy**, v.25, p. 675-88, 2000.
- BECKER, S. Calculation of direct solar and diffuse radiation in Israel. **International Journal of Climatology**, v.21, p1561-76, 2001.
- CAMPS, J. SOLER, M.R. Estimation of diffuse solar irradiance on a horizontal surface for cloudless day- anew approach. **Solar Energy**, v.49, p. 53-63, 1992.
- CAVALCANTI, E.S.C. Analysis of experimental solar radiation for Rio de Janeiro, Brazil. **Solar Energy**, v.47, p.231-235, 1991.
- CHAÂBANE, .M., MASMOUDI, M. MEDHIOUB, K. Determination of Linke turbidity factor from solar radiation measurement in northern Tunisia. **Renewable Energy**, v. 29, p. 2065–2076, 2004.
- COULSON, K. L. **Solar and terrestrial radiation, methods and measurements**. New York: Academic Press, 1975, 322p.
- DEHNE, K. Diffuse solar radiation measured by the shade ring method improved by a correction formula. Instruments and observing methods, Report n. 15, **World Meteorological Organization**, p. 263-7, 1984.
- DIABATÉ, L. REMUND , J. WALD, L. Linke turbidity factors for several sites in Africa. **Solar Energy**, v.75, p.111-119, 2003.
- ERBS, D.G., KLEIN, S.A., DUFFIE, J.A. Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation. **Solar Energy**, v.28, p.293-302, 1982.
- GARRISON, J.D. A study of the division of global solar irradiance into direct and diffuse irradiance at thirty three U.S. sites. **Solar Energy**, v.35, p.341-55, 1985.
- GONZÁLEZ, J., CALBÓ, J. Influence of the global radiation variability on the hourly diffuse fraction correlations. **Solar Energy**, v.65, n.2, p.119-31, 1999.

HAY, J.E. Calculation of monthly mean solar radiation for horizontal and inclined surfaces. **Solar Energy**, v.33, n.4, p.301-307, 1979.

HUSSAIN, M. Correlation beam radiation with sunshine duration. **Solar Energy**, v.48, n.3, p. 145-149, 1992.

HUSSAIN, M. KHATUN, S., RASUL, M.G. Determination of atmospheric turbidity in Bangladesh. **Renewable Energy**, v.20, p. 325-32, 2000.

IQBAL, M. A study of Canadian diffuse and total solar radiation data - I, Monthly average daily horizontal radiation. **Solar Energy**, v.1, p.81-86, 1979a.

IQBAL, M. A study of Canadian diffuse and total solar radiation data - II, Monthly average hourly horizontal radiation. **Solar Energy**, v.22, p.87-90, 1979b.

IQBAL, M. **An introduction to solar radiation**. New York: Academic Press, 1983. 390p.

JACOVIDES, C. P., HADJIOANNOU, L., PASHIARDIS, S., STEFANOU, L. On the diffuse fraction of daily and monthly global radiation for the island of Cyprus. **Solar Energy**, v.56, n.6, p.565-72, 1996.

JETER, S. M., BALARAS, C. A. Development of improved solar radiation models for predicting beam transmittance. **Solar Energy**, v.44, p.149-56, 1990.

KARAYEL, M., NAVVAB, M. NE'EMAN, E., SELKOWITZ, S. Zenith luminance and sky luminance distributions for daylighting calculations. **Energy and Buildings**, v. 6, n.3, p. 283-91, 1984.

KARALIS, J.D. Characteristics of direct photosynthetically active radiation. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.48, p.225-34, 1989.

- KASTEN, F. The Linke turbidity factor based on improved values of the integral Rayleigh optical thickness. **Solar Energy**, v.56, n.3, p.239-44, 1996.
- LAM, J.C., LI, D.H.W. Correlations between global solar radiation and its direct and diffuse components. **Building and Environment**, v.31, p.527-35, 1996.
- LI, D.H.W. e LAM, J.C. A study of atmospheric turbidity for Hong Kong. **Renewable Energy**, v.25, p. 1-13, 2002.
- LINKE, F. Die Sonnenstrahlung und ihre Schwächung in der Atmosphäre. Handbuch Geophysic, 8, 1942.
- LIU, B. Y. H., JORDAN, R. C. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. **Solar Energy**, v.3, n.4, p.1-19, 1960.
- LOPEZ, G., RUBIO, M.A., BATLLES, F.J. Estimation of hourly direct normal from measured global solar irradiance in Spain, **Renewable Energy**, v.21, p. 171-86, 2000.
- LOUCHE, A. PERI, G., IQBAL, M. An analysis of Linke turbidity factor. **Solar Energy**, v.37, n.6, p.393-6, 1986.
- LOUCHE, A., NOTTON, G., POGGI, P., SIMONNOT, G. Correlations for direct normal and global horizontal irradiation on a French Mediterranean site. **Solar Energy**, v.46, p.261-66, 1991.
- MADUEKWE, A. A. L.; CHENDO, M. A. C. Predicting the components of the total hemispherical solar radiation from sunshine duration measurements in Lagos, Nigeria. **Renelable Energy**, Vol. 6, No. 7, p. 807 812, 1995.
- MANI, A., RANGARAJAN, S. Techniques for the precise estimation of hourly values of global, diffuse and direct solar radiation. **Solar Energy**, v.31, n.6, p. 577-595, 1983
- MOLINEAUX, B., INEICHEN, P. On the broad band transmittance of direct irradiance in a cloudless sky and its application to the parameterization of atmospheric turbidity. **Solar Energy**, v.56, p.553-63, 1996.

- OLIVEIRA, A.P., ESCOBEDO, J.F., MACHADO, A.J., SOARES, J. Correlation models of diffuse-solar radiation applied to the city of São Paulo, Brazil. **Applied Energy**, v.71, p.59-73, 2002a.
- OLIVEIRA, A.P., MACHADO, A.J., ESCOBEDO, J.F., SOARES, J. Diurnal evolution of solar radiation at the surface in the city of São Paulo: seasonal variation and modeling. **Theoretical and Applied Climatology**, v.71, p.231-250, 2002b.
- OLMO, F.J., BATLLES, F.J., ALADOS-ARBOLEDAS, L. Performance of global to direct/diffuse decomposition models before and after the eruption of mt. Pinatubo. June 1991. **Solar Energy**, v.57, p.433-43, 1996.
- ORGILL, J. F., HOLLANDS, K. G. T. Correlation equation for hourly diffuse radiation on a horizontal surface. **Solar Energy**, v.19, n.3, p.357-359, 1977.
- PAINTER, H. E. The shade ring correction for diffuse irradiance measurements. **Solar Energy**, v.26, p.361-3, 1981.
- PEDRÓS, R., UTRILLAS, M. P., MARTÍNEZ-LOZANO, J. A., TENA. F. Values of broad band turbidity coefficients in a Mediterranean coastal site. **Solar Energy**, v.66, n.1, p.11-20, 1999.
- REINDL, D. T., BECKMAN, W. A., DUFFIE, J. A. Diffuse fraction correlations. **Solar Energy**, v.45, n.1, p.1-7, 1990.
- RERHRHAYE, A., ZENAF, M., FLECHON, J. Estimation of the beam from seasonal correlations. **Renewable Energy**, v.6, p.779-785, 1995.
- ROBINSON, N. **Solar Radiation**. Amsterdam: Elsevier, 347 p., 1966.
- SHALTOUT, M.A.M, HASSAN, A.H., FATHY, A.M. Study of the solar radiation over Menia. **Renewable Energy**, v.23, p.621-639, 2001.

- SIRÉN, K. E. The shadow band correction for diffuse irradiation based on a two-component sky radiance model. **Solar Energy**, v.39, n.5, p.433-8, 1987.
- SKARTVEIT, A., OLSETH, J. A. A model for the diffuse fraction of hourly global radiation. **Solar Energy**, v.38, p.271-4, 1987.
- SOARES, J., OLIVEIRA, A.P., BOZNAR, M.Z., MLAKAR, P., ESCOBEDO, J.F., MACHADO, A.J. Modeling hourly diffuse solar-radiation in the city of São Paulo using a neural-network technique. **Applied Energy**, v.79, p.201-204, 2004.
- SOLER, A. Dependence on latitude of the relation between the diffuse fraction of solar radiation and the ratio of global to - extraterrestrial radiation for monthly average daily values. **Solar Energy**, v.44, n.5, p.297-302, 1990.
- SOUZA, J.L., NICÁCIO, R.M., MOURA, M.A.L. Global solar radiation measurements in Maceió, Brazil. **Renewable Energy**, v.30, p.1203-1220, 2005.
- STANHILL, G. Observations of shade-ring correction factors for diffuse sky radiation measurements at the Dead Sea. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v.111, p.1125-30, 1985.
- STONE, R. J. Improved statistical procedure for the evaluation of solar radiation estimation models. **Solar Energy**, v.51, n.4, p.289-91, 1993.
- SUEHRCKE, H., McCORMICK, P. G. The frequency distribution of instantaneous insolation values. **Solar Energy**, v.40, p.413-22, 1988.
- TIBA, C. AGUIAR, R., FRAIDENRAICH, N. Analysis of a new relationship between monthly global irradiation and sunshine hours from a database of Brazil. **Renewable Energy**, v.30, p.957-966, 2005.
- TIRIS, M., TIRIS, Ç., TÜRE, I.E. Correlations of monthly-average daily global, diffuse and beam radiations with hours of bright sunshine in Gebze, Turkey. **Energy Conversion** v.37, v. 9, p. 1417-1421, 1995.

VIGNOLIA, F. , McDANIELS, D. K. Beam-global correlations in the pacific northwest.
Solar Energy, v.36, p.409-18, 1986.

WILLMOTT, C.J. On the validation of models. **Physical Geography**. v.2, p.184-94, 1981.