

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU

**ESTIMATIVA DA IRRADIAÇÃO TOTAL SOBRE UMA
SUPERFÍCIE INCLINADA A PARTIR DA
IRRADIAÇÃO GLOBAL NA
HORIZONTAL**

JOSÉ SCOLAR

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Doutor em Agronomia – Área de Concentração: Energia na Agricultura.

Botucatu-SP
Fevereiro – 2003

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU

**ESTIMATIVA DA IRRADIAÇÃO TOTAL SOBRE UMA
SUPERFÍCIE INCLINADA A PARTIR DA
IRRADIAÇÃO GLOBAL NA
HORIZONTAL**

JOSÉ SCOLAR

Orientador: Prof. Dr. Dinival Martins

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Doutor em Agronomia – Área de Concentração: Energia na Agricultura.

Botucatu-SP
Fevereiro – 2003

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. Dinival Martins, pela orientação e amizade.

Ao professor Dr. João Francisco Escobedo pela valiosa contribuição na discussão dos resultados, e fornecimento dos dados utilizados na elaboração da tese.

Aos colegas do curso que direta ou indiretamente contribuíram com este trabalho, em especial, aos colegas Alexandre Del Pai e Antonio Ribeiro da Cunha.

A FAPESP, pelo apoio financeiro na construção da infra estrutura do laboratório de Radiometria Solar.

SUMÁRIO

	Página
.....	
LISTA DE QUADROS	VII
LISTA DE FIGURAS.....	XIII
LISTA DE SÍMBOLOS.....	XII
1 RESUMO.....	1
2 SUMMARY.....	3
3 INTRODUÇÃO.....	5
4 REVISÃO DE LITERATURA.....	8
4.1 Modelos de estimativa da irradiância total em uma superfície inclinada.....	8
4.1.1 Modelos de estimativa da irradiância difusa	10
4.1.1.1 Modelo isotrópico.....	10
4.1.1.2. Modelos anisotrópico.....	11
5 MATERIAL E MÉTODOS.....	20
5.1 Descrição do campo experimental e período do experimento.....	20
5.2. Equações utilizadas para calcular a irradiância no topo da atmosfera.....	22
5.2.1. Irradiância no topo da atmosfera para uma superfície horizontal.....	22
5.2.2. Irradiância no topo da atmosfera para uma superfície inclinada com face voltada para o Equador.....	23
5.2.3. Fator de correção da irradiância na superfície inclinada em relação a superfície horizontal	25

5.2.4 Irradiação no topo da atmosfera.....	26
..... Página	
5.3 Irradiação ao nível de superfície.....	27
5.3.1 Irradiação direta na horizontal.....	27
5.3.2 Irradiação global na superfície horizontal.....	27
5.3.3 Irradiação difusa na superfície horizontal.....	28
5.4 Irradiação total observada na superfície inclinada.....	28
5.5 Estimativa da irradiação total em uma superfície inclinada.....	28
5.5.1 Irradiação direta que incide na superfície inclinada.....	29
5.5.2 Irradiação refletida pelo solo que incide na superfície inclinada.....	29
5.5.3 Irradiação difusa que incide na superfície inclinada.....	30
5.6 Modelos modificados de estimativa da irradiação total.....	31
5.7 Modelo estatístico para estimar a irradiação total.....	34
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	36
6.1 Níveis de irradiação extraterrestre nas superfícies horizontal e inclinada.....	36
6.1.1 Distribuição de desvio relativo.....	37
6.2 Níveis de irradiação observada nas superfícies horizontal e inclinada.....	40
6.3 Avaliação dos modelos de estimativa da irradiação total na superfície inclinada.....	44
6.3.1 Estimativa da irradiação total diária.....	44
6.3.1.1 Erro Quadrático médio e Erro médio.....	51

6.4 Estimativa da irradiação total diária com os modelos modificados.....	53
6.4.1 Modelos conceituais de estimativa das irradiações difusa e direta.....	53
..... Página	
6.5 Modelo estatístico para estimar a irradiação total diária.....	61
6.6 Validação dos modelos de estimativa da irradiação total.....	65
6.6.1 Validação anual.....	65
6.6.2 Validação mensal.....	74
7 CONCLUSÕES.....	87
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	89

LISTA DE QUADROS

Quadro.....	Página
1 Intervalos de e para cada categoria.....	16
2 Coeficientes F_1 e F_2 para cada categoria de e , compilados de Perez et al. (1987).....	17
3 Valores de EQM e EM, em porcentagem para a irradiação total diária estimada com os vários modelos.....	52
4 Valores de EQM e EM, em porcentagem para a irradiação total diária estimada com os vários modelos modificados, por $K_d = f(K_t)$ e $K_{BH} = f(K_t)$, e para os modelos originais.....	60
5 Valores de EQM e EM, em porcentagem os vários modelos de estimativa da irradiação total, utilizando o conjunto de dados da validação.....	66
6 Valores de EQM e EM, para a validação da irradiação total diária estimada com os vários modelos modificados, $K_d = f(K_t)$ e $K_{BH} = f(K_t)$, e os erros obtidos com os modelos originais.....	68
7 Maiores erros em porcentagem na validação dos modelos de estimativa da irradiação total diária, para um dia em particular, considerando os modelos modificados por, $K_d = f(K_t)$	69
8 Maiores erros em porcentagem na validação dos modelos de estimativa da irradiação total diária, para um dia em particular, considerando os modelos modificados por, $K_{BH} = f(K_t)$	73

9 EM e EQM, em porcentagem para o modelo estatístico semestral.....	83
---	----

LISTA DE FIGURAS

Figura.....	Página
5.1 Estação de Radiometria Solar do Departamento de Recursos Naturais, UNESP.....	21
5.2 Piranômetros na Plataforma Inclinada.....	21
5.3 Esquema ilustrativo da igualdade dos ângulos q_z para a superfície horizontal na latitude $(f + b)$, e q_b para a superfície inclinada na latitude f	24
6.1 Irradiação extraterrestre diária projetada nas superfícies inclinada horizontal, em relação ao dia do ano.....	37
6.2 Desvio relativo considerando a irradiação extraterrestre diária calculada nas superfícies inclinada e horizontal, em relação ao dia do ano.....	38
6.3. Diferença entre a irradiação extraterrestre diária calculada, considerando as superfícies inclinada e horizontal, em relação ao dia do ano.....	39
6.4. Desvio relativo considerando a irradiação diária medida nas superfícies inclinada e horizontal, durante o ano de 1998.....	41
6.5 Diferença entre a irradiação diária medida nas superfícies inclinada e horizontal, durante o ano de 1998.....	41
6.6. Média mensal observada da irradiação recebida nas superfícies inclinada e horizontal ,durante o ano de 1998.....	42

6.7. Diferença mensal de energia entre as superfícies inclinada e a horizontal para os valores observados e para os valores extraterrestre calculados, durante o ano de 1998.....	43
Figura.....	Página
6.8. Distribuição da Irradiação total diária no plano inclinado estimada através dos modelos, Liu & Jordan (A), Perez et al. (B), Hay (C) e Reindl et al. (D), em função dos valores observados. A linha contínua é a reta de 45°.....	46
6.9. Distribuição da Irradiação total diária no plano inclinado estimada através dos modelos, Temps & Coulson (A), Klucher (B) e Circunsolar (C), em função dos valores observados. A linha contínua é a reta de 45°	47
6.10. Valores diários de R_B em função do dia do ano.....	50
6.11. Distribuição diária de K_d em função de K_t . E o modelo ajustado por regressão linear polinomial de 4º grau (linha contínua).....	54
6.12. Distribuição diária de K_{BH} em função de K_t . E o modelo ajustado por regressão linear polinomial de 1º grau (linha contínua).....	56
6.13. Distribuição da irradiação total diária no plano inclinado estimada através dos vários modelos modificados com $K_d = f(K_t)$, em função dos valores observados. A linha contínua é a reta de 45°.....	58
6.14. Distribuição da irradiação total diária no plano inclinado estimada através dos vários modelos modificados com $K_{BH} = f(K_t)$, em função dos valores observados. A linha contínua é a reta de 45°.....	59

6.15. Distribuição diária da irradiação total medida na superfície inclinada, em função da irradiação global medida na superfície horizontal.....	62
6.16 Distribuição diária de RBS, em função de R_B	63
Figura.....	Página
6.17. Distribuição diária da irradiação total ajustada através de regressão linear múltipla $RBSA$, em função da irradiação total observada. A linha continua é reta de 45°	64
6.18. Distribuição diária da irradiação total validada com o modelo de regressão linear múltipla, em função da irradiação total observada. A linha continua é reta de 45°	67
6.19. Distribuição da irradiação total diária no plano inclinado validada através dos vários modelos modificados com K_d em função dos valores observados. A linha continua é a reta de 45°	71
6.20. Distribuição da irradiação total diária no plano inclinado validada através dos vários modelos modificados com $K_{BH} = f(K_t)$, em função dos valores observados. A linha continua é a reta de 45°	72
6.21. EM mensal para a irradiação total diária estimada com os modelos de Liu & Jordan, Hay, Perez et al. e estatístico.....	75
6.22. EQM mensal para a irradiação total diária estimada com os modelos de Liu & Jordan, Hay, Perez et al. e regressão linear.....	76

6.23. EM mensal para a irradiação total diária validada com os modelos de Liu & Jordan, Hay, Perez et al., modificados por K_d	77
6.24 EQM mensal para a irradiação total diária validada com os modelos de Liu & Jordan, Hay, Perez et al., modificados por K_d	78
Figura.....	Página
6.25. EM mensal para a irradiação total diária validada com os modelos de Liu & Jordan, Hay, Perez et al., modificados por K_{BH}	80
6.26. EQM mensal para a irradiação total diária validada com os modelos de Liu & Jordan, Hay, Perez et al., modificados por K_{BH}	81
6.27. EM mensal para a irradiação total diária validada com os modelos de Hay, regressão linear semestral e Hay modificado por K_{BH}	84
6.28. EQM mensal para a irradiação total diária validada com os modelos de Hay, regressão linear semestral e Hay modificado por K_{BH}	85

LISTA DE SÍMBOLOS

I_g	Irradiância global na horizontal (W/m^2)
I_b	Irradiância direta na incidência (W/m^2)
I_{bh}	Irradiância direta na horizontal (W/m^2)
b	ângulo de inclinação em relação a superfície horizontal (graus)
I_{bb}	Irradiância direta na superfície inclinada (W/m^2)
I_{bt}	Irradiância total na superfície inclinada (W/m^2)
I_0	Irradiância no topo da atmosfera na horizontal (W/m^2)
I_{b0}	Irradiância no topo da atmosfera para a superfície inclinada (W/m^2)
I_{sc}	Constante solar ($1367 W/m^2$)
H_0^d	Irradiação diária no topo da atmosfera na horizontal (MJ/m^2)
H_b^d	Irradiação direta diária na incidência (MJ/m^2)
H_d^d	Irradiação difusa diária na horizontal (MJ/m^2)
H_{bh}^d	Irradiação direta diária na horizontal (MJ/m^2)
H_g^d	Irradiação global diária na horizontal (MJ/m^2)
H_{bT}^d	Irradiação total diária estimada na superfície inclinada (MJ/m^2)

H_{b0}^d	Irradiação diária no topo da atmosfera na superfície inclinada (MJ/m^2)
H_{bTO}^d	Irradiação total diária observada na superfície inclinada (MJ/m^2)
H_{bd}^d	Irradiação difusa diária estimada na superfície inclinada (MJ/m^2)
H_{br}^d	Irradiação diária refletida pela superfície do solo (MJ/m^2)
H_{bb}^d	Irradiação direta diária na superfície inclinada (MJ/m^2)
q_z	Ângulo zenital do Sol (graus)
q_b	Ângulo de incidência dos raios solares na superfície inclinada (graus)
d	Declinação solar
f	Latitude (graus)
r	Albedo da superfície
e	Índice de turbidez atmosférica
m_r	massa ótica da atmosfera
E_0	fator de correção da excentricidade da órbita terrestre
$A_I = \frac{H_{bh}^d}{H_0^d}$	Índice anisotrópico
$R_B = \frac{H_{b0}^d}{H_0^d}$	fator de correção na incidência dos raios solares na superfície inclinada

$$K_d = \frac{H_d^d}{H_g^d}$$

Razão entre a irradiação difusa e a irradiação global

$$K_{BH} = \frac{H_b^d}{H_g^d}$$

Razão entre a irradiação direta e a irradiação global

$$K_t = \frac{H_g^d}{I_0}$$

Índice de claridade

$$F = [1 - (K_d)^2]$$

Função modeladora

1 RESUMO

Neste trabalho, realizou-se um estudo de modelagem da irradiação total que incide sobre uma superfície inclinada, com face voltada para o Equador, e com inclinação de 22,85°, igual a da latitude local. Foram testados 7 modelos, existentes na literatura, utilizando partição diária de energia. Os modelos de Temps & Coulson, Klucher e circunsolar, apresentam os piores desempenhos e não devem ser utilizados na estimativa da irradiação total diária em Botucatu, por outro lado os modelos de Liu & Jordan, Hay, Perez et al. e Reindl et al., são similares entre si, e apresentam boa concordância quando comparados com os dados observacionais, sendo o modelo de Hay ligeiramente superior aos outros. O propósito deste trabalho é obter um modelo que utilize somente a irradiação global medida na superfície horizontal para estimar a irradiação total na superfície inclinada. Para tanto, os modelos de estimativa foram modificados de duas maneiras diferentes. Na primeira, a irradiação difusa foi estimada em função da irradiação global, através do ajuste empírico utilizando a técnica de regressão linear, na forma $K_d = f(K_t)$, fração da difusa

contida na global (K_d), com o índice de claridade (K_t), nesse caso, o melhor ajuste é dado por um polinômio de 4º grau $K_d = 0,993 + 0,178 K_t - 0,945 K_t^2 - 4,712 K_t^3 + 4,891 K_t^4$. Na Segunda modificação, a irradiação direta K_{BH} , fração da irradiação direta contida na irradiação global, foi ajustada através da técnica de regressão linear, em função do índice de claridade, na forma $K_{BH} = f(K_t)$, nesse caso o melhor ajuste foi linear, obtido para intervalos específicos de K_t , $K_{BH} = 0$ para $K_t \leq 0,25$, e $K_{BH} = -0,386 + 1,572 K_t$ para $K_t > 0,25$. Os resultados obtidos com essas modificações mostram que os modelos têm melhores desempenhos para a modificação feita com a função $K_{BH} = f(K_t)$, e o modelo modificado de Hay é o melhor modelo para ser utilizado em Botucatu-SP. Finalmente, é desenvolvido um modelo obtido com a técnica de regressão linear múltipla que consiste em relacionar, a razão da irradiação total pela irradiação global

observadas na superfície ($\frac{H_{bTO}^d}{H_g^d}$), com a mesma razão observada no topo da atmosfera (R_B) e

com o índice de claridade (K_t), isto é, $\frac{H_{bTO}^d}{H_g^d} = f(R_B, K_t)$. O melhor resultado é alcançado para

os ajustes com observações semestrais. As duas equações são utilizadas no cálculo final de estimativa da irradiação total na superfície inclinada. O resultado obtido com o modelo de regressão linear, quando se utiliza partição diária de energia, tem desempenho equivalente a dos modelos de estimativa da irradiação total, tanto quanto com os modelos modificados por $K_{BH} = f(K_t)$.

Estimation of the total irradiation on a tilted surface facing toward the equator from de horizontal global irradiation. Botucatu, 2002. 93p.

Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: JOSÉ SCOLAR

Adviser: DINIVAL MARTINS

2 SUMMARY

A modelling study of the total irradiation reaching a tilted surface facing towards the equator at tilt same of local latitude of $22,85^\circ$, is presented. In this study seven total irradiation incident on a tilted surface estimate models were tested and compared among them, using the daily partitioning energy. Temps & Coulson, Klucher and circumsolar models showed very poor results, and it is suggested that they should not be used to estimate the daily total irradiation for the Botucatu region. On the other hand the Liu & Jordan, Hay, Perez et al. and Reindl et al. models have shown similar performance and presented a good agreement with the observational data. The Hay model however produced better irradiation estimates. The aim of this study is examine and improved irradiation estimative model for tilted surface knowing only the global irradiation measured at horizontal surface. In order to achieve this, two modifications were made on those models mentioned above. The first modification consisted to apply empirical functions to determine the diffuse irradiation by the global radiation measurements. These empirical functions were tuned using the regression linear thecnique, the fraction of the diffuse irradiation (K_d) from the global irradiation, was correlated

with the clearness index (K_t). In this case the highest correlation found was,

$$K_d = 0,993 + 0,178K_t - 0,945K_t^2 - 4,712K_t^3 + 4,891K_t^4$$

a fourth order polynomial function. In the second modification the fraction of the direct irradiation K_{BH} from the global irradiation was correlated assuming a linear correlation at given intervals of K_t : $K_{BH} = 0$ for

$$K_t \leq 0,25, \text{ and } K_{BH} = -0,386 + 1,572 K_t \text{ for } K_t > 0,25 \text{ otherwise.}$$

Model results showed the empirical relationship $K_{BH} = f(K_t)$, present better results and the Hay model presented a better

performance compared with others models for the Botucatu region. Finally it is developed a model

based on the linear regression technique which correlates the rate of total irradiation to the global

observed at surface ($\frac{H_{bTO}^d}{H_g^d}$) with similar irradiation rate compute at the top of the atmosphere

(R_B) and the clearness index (K_t), that is, $\frac{H_{bTO}^d}{H_g^d} = f(R_B, K_t)$. The best results were attained for

semester correlation with two resulting equations, which are used to estimate the total irradiation for

tilted surface. The linear regression model has similar performance to the models of total irradiation

when the partitioning of daily energy is applied for both original and modified models with

$$K_{BH} = f(K_t).$$

Keywords: irradiation total, irradiation at tilted surface, linear regression model.

3 INTRODUÇÃO

A observação quantitativa da radiação solar que incide sobre superfícies inclinadas em relação à superfície horizontal, com diferentes ângulos de inclinação e ângulo azimutal arbitrário, é utilizada em uma grande variedade de aplicações, incluindo projetos de engenharia para coletores solares, projetos de arquitetura, planejamento urbano, estudos agronômicos de insolação sobre vegetação e em estudos micrometeorológico sobre circulação local. Para satisfazer qualquer um desses estudos, é necessário conhecer a intensidade da radiação solar que incide sobre uma superfície inclinada e sua variação sazonal por um período mínimo de um ano. Contudo, o alto custo instrumental e a necessidade de pessoal operacional dificultam a implantação e operação de uma rede de estações de radiometria solar, o resultado é um número limitado de estações ao redor do globo terrestre para observações das componentes da radiação solar na superfície horizontal e principalmente a observação da radiação solar em uma superfície inclinada, já que nem todas as estações de radiometria solar fazem essas medidas.

Devido à falta de observações da radiação solar que incide em uma superfície inclinada, vários modelos teóricos de estimativa foram desenvolvidos, utilizando medidas da radiação global e da componente direta da radiação obtidas na superfície horizontal (Liu & Jordan, 1963; Hay, 1979; Temps & Coulson, 1977; Klucher, 1979, Perez et al. 1987). Esses modelos utilizam individualmente os valores da radiação direta, difusa e da refletida pela superfície do solo como componentes da radiação total que incide sobre uma superfície inclinada. A única diferença entre os vários modelos existentes está no tratamento da radiação difusa que incide sobre a superfície inclinada, devido ao seu comportamento anisotrópico.

Em muitas localidades a componente direta da radiação solar não é medida, existindo somente observações da radiação global na superfície horizontal. Nessa circunstância, para estimar a radiação total que incide sobre uma superfície inclinada, a componente difusa da radiação solar deve ser estimada, isso é feito através do uso de modelos conceituais que relacionam a fração da radiação difusa contida na radiação global com o índice de claridade. São exemplos de correlações entre a fração difusa e o índice de claridade os modelos (Erbs et al., 1982; Oliveira et al. 2002; Ricieri, 1988); nesse caso, os modelos empíricos de estimativa da radiação difusa desenvolvidos em uma determinada localidade em conjunto com os valores da radiação solar global medida localmente na superfície horizontal são utilizados para estimar a radiação total na superfície inclinada (Klein, 1977; Bugler, 1977; Notton et al., 1996; Behr, 1997).

O objetivo deste trabalho é obter um modelo para estimar a radiação total que incide em uma superfície inclinada para Botucatu-SP, seguindo os seguintes passos:

- (a) avaliar vários modelos, existentes na literatura, de estimativa da radiação total que incide em uma superfície inclinada utilizando os valores das componentes direta e difusa da radiação solar medidos na superfície horizontal e verificar qual deles apresenta o melhor desempenho;
- (b) testar os vários modelos de estimativa da radiação total que incide em uma superfície inclinada, modificados através de modelos conceituais de estimativa da radiação difusa, na forma $K_d = f(K_t)$, e da radiação direta projetada na horizontal, na forma $K_{BH} = f(K_t)$ ajustados localmente através de regressão linear, com a finalidade de eliminar a dependência que esses modelos de estimativa têm da radiação difusa ou da direta, e verificar o desempenho dos modelos modificados por essas relações empíricas;
- (c) propor um modelo estatístico de estimativa da irradiação total diária, ajustado através de regressão linear, entre a radiação total medida na superfície inclinada e a radiação global medida na superfície horizontal.

4 REVISÃO DE LITERATURA

4.1 Modelos de estimativa da irradiação total em uma superfície inclinada

A irradiação total diária H_{bT}^d , que incide em uma superfície inclinada, com um ângulo b de inclinação em relação a superfície horizontal, é dada pela soma das irradiações direta H_{bb}^d , difusa H_{bd}^d e a refletida pelo solo H_{br}^d , isto é:

$$H_{bT}^d = H_{bb}^d + H_{bd}^d + H_{br}^d \quad 4.1$$

A irradiação direta que atinge a superfície inclinada, segundo Iqbal (1983), é calculada através da correção da irradiação direta projetada na horizontal H_{bh}^d , sendo dada pela seguinte expressão:

$$H_{bb}^d = H_{bh}^d R_B \quad 4.2$$

onde, $R_B = \cos(\mathbf{q}_b) / \cos(\mathbf{q}_z)$ é o fator de correção devido à mudança no ângulo de incidência dos raios solares sobre a superfície inclinada, \mathbf{q}_z é o ângulo zenital do Sol e \mathbf{q}_b é o ângulo de incidência dos raios solares sobre uma superfície inclinada com a face voltada para o equador.

Considerando que a reflexão pela superfície do solo seja isotrópica, a fração da energia refletida pelo solo que atinge a superfície inclinada é dada por:

$$H_{br}^d = H_g^d \mathbf{r} \frac{1}{2} (1 - \cos(\mathbf{b})) \quad 4.3$$

onde, \mathbf{r} é o albedo da superfície definido como a irradiação refletida por uma superfície sobre a irradiação incidente nessa superfície, H_g^d é a irradiação global, \mathbf{b} é o ângulo de inclinação e o termo $[\frac{1}{2}(1 - \cos(\mathbf{b}))]$ é a razão entre a irradiação incidente na superfície inclinada sobre a radiação refletida pelo solo.

Esse tratamento matemático para as irradiações direta e a refletida pelo

solo, que incidem em uma superfície inclinada, é comum à maioria dos modelos, excetuando-se uns poucos, como por exemplo, os de Temps & Coulson (1977) e Gueymard (1987), que dão tratamento anisotrópico para a irradiação refletida pelo solo. A diferença básica entre os vários modelos de estimativa da irradiação total, está na modelagem da irradiação difusa, desde que a sua distribuição espacial e temporal geralmente é desconhecida devido ao seu comportamento anisotrópico, tornando-a uma variável difícil de ser modelada.

4.1.1 Modelos de estimativa da irradiação difusa

Normalmente são utilizadas três sub-componentes para avaliar o comportamento anisotrópico da radiação difusa: circunsolar, brilho horizontal e radiação difusa isotrópica. A irradiação difusa que vem da região ao redor do disco solar, é chamada de circunsolar, sendo predominantemente resultante do espalhamento devido aos aerossóis existente na atmosfera. O aumento na intensidade da radiação difusa próximo ao horizonte é chamado de brilho horizontal, devido ao fato que a radiação incidente percorre uma trajetória maior na atmosfera próximo ao horizonte e também devido às múltiplas reflexões na atmosfera terrestre. Isotrópica é o restante da radiação difusa assumida ser uniformemente distribuída na porção restante da hemisfério celeste.

Vários modelos têm sido proposto para estimar a irradiação difusa que atinge uma superfície inclinada; no entanto, nem todos consideram essas três sub-componentes.

4.1.1.1 Modelo isotrópico

Nesse modelo, a intensidade da irradiação difusa é assumida ser uniforme em toda a hemisfério celeste. Sendo portanto, válido para condições de céu nublado, condição na

qual a irradiação difusa é suposta isotrópica. Seguindo o mesmo procedimento adotado para a irradiação refletida pelo solo, (Garnier & Ohmura, 1970; Liu & Jordan, 1963; Iqbal, 1983), propõem a seguinte equação para o cálculo da irradiação difusa que atinge a superfície inclinada:

$$H_{bd}^d = H_d^d \frac{1}{2}(1 + \cos \mathbf{b}) \quad 4.4$$

onde o termo $[\frac{1}{2}(1 + \cos(\mathbf{b}))]$ é a razão entre a irradiação difusa incidente na superfície inclinada sobre a irradiação difusa vinda da cúpula do céu, e H_d^d é a irradiação difusa que incide na superfície horizontal.

Esse modelo é conhecido como de Liu & Jordan, e apresenta bons resultados para condições de céu nublado, quando a irradiação difusa assume comportamento isotrópico. No entanto, em condições de céu claro, a irradiação difusa tem um comportamento anisotrópico, e o modelo subestima os valores calculados. Portanto, para o cálculo da irradiação difusa que atinge a superfície inclinada é necessário que os modelos incorporem os efeitos tanto da isotropia quanto da anisotropia da irradiação difusa.

4.1.1.2. Modelos anisotrópico

Quando se considera o comportamento anisotrópico da irradiação difusa, o modelo mais simples encontrado na literatura é o circunsolar. Ele assume que toda a irradiação difusa origina-se diretamente no disco solar. Portanto, a irradiação difusa que atinge a superfície inclinada pode ser tratada da mesma maneira que a irradiação direta, sendo corrigida apenas pela mudança no

ângulo de incidência dos raios solares na superfície inclinada. Com esse tratamento, a irradiação difusa que incide no plano inclinado é escrita da seguinte maneira:

$$H_{bd}^d = H_d^d R_B \quad 4.5$$

De maneira geral, o modelo circunsolar superestima os valores calculados para a superfície inclinada, sendo que obtêm-se melhores resultados para condições de céu claro do que para condições de céu parcialmente nublado ou totalmente nublado.

Temps & Coulson (1977) observaram que em dias de céu claro a irradiação difusa próximo ao horizonte é mais intensa do que no zênite do Sol (brilho horizontal), e determinaram empiricamente que o termo $[1 + \text{sen}^3(\mathbf{b} / 2)]$ contribui razoavelmente bem para o brilho horizontal observado. Similarmente, o brilho do céu próximo do Sol (circunsolar) é aproximado pelo fator $[1 + \text{cos}^2(\mathbf{q}_b) \text{sen}^3(\mathbf{q}_Z)]$. Dessa maneira o modelo isotrópico de Liu & Jordan é modificado para incluir o comportamento anisotrópico da irradiação difusa da seguinte maneira:

$$H_{bd}^d = H_d^d (1 + \text{cos } \mathbf{b}) [1 + \text{sen}^3(\mathbf{b} / 2)] [1 + \text{cos}^2(\mathbf{q}_b) \text{sen}^3(\mathbf{q}_Z)] \quad 4.6$$

O modelo de Temps & Coulson tem melhor concordância para dias com céu claro do que para os de céu nublado. Com a finalidade de obter um modelo universal, Klucher (1979) propõe uma função modeladora, $[F = 1 - (H_d^d / H_g^d)^2]$, aplicada nos fatores de

correção do modelo de Temps & Coulson com o propósito de ajustar o modelo quando as condições atmosférica variam de céu claro a nublado. O modelo de Klucher é escrito da seguinte forma:

$$H_{bd}^d = H_d^d (1 + \cos \mathbf{b}) [1 + F \sin^3(\mathbf{b}/2)] [1 + F \cos^2(\mathbf{q}_b) \sin^3(\mathbf{q}_Z)] \quad 4.7$$

Para dias com céu nublado, $H_d^d / H_g^d \rightarrow 1$, $F \rightarrow 0$, e portanto, o modelo de Klucher tende ao modelo isotrópico de Liu & Jordan; em condições de céu claro em que a razão da irradiação difusa pela global é pequena, $F \rightarrow 1$, o modelo aproxima-se do de Temps & Coulson.

Hay (1979) considera a irradiação difusa composta das subcomponentes circunsolar vinda diretamente do disco solar e a isotropicamente distribuída vinda do resto da hemisfério celeste. Para cada componente, é dado um peso específico através do índice anisotrópico definido como a razão entre a irradiação direta na superfície horizontal e a irradiação extraterrestre, isto é, $(A_I = H_{bh}^d / H_0^d)$. Esse índice define a porcentagem da irradiação difusa a ser tratada como circunsolar, com a porcentagem restante considerada isotrópica. Em condições de céu claro, o índice anisotrópico tende a um, e a irradiação difusa circunsolar é mais fortemente ponderada do que a irradiação difusa isotrópica. Em condições de céu nublado, o índice anisotrópico tende a zero e toda a irradiação difusa é tratada como isotrópica. Esse comportamento é consistente com a irradiação difusa observada. A irradiação difusa circunsolar ponderada através do índice anisotrópico é projetada na superfície inclinada da mesma maneira que a componente da irradiação direta.

$$I_c = H_d^d A_I R_B \quad 4.8$$

E a irradiação difusa isotrópica ponderada por esse índice é dada por:

$$I_{si} = H_d^d \left[\frac{1}{2} (1 + \cos \mathbf{b})(1 - A_I) \right] \quad 4.9$$

Portanto, a irradiação difusa que atinge o plano inclinado, no modelo proposto por Hay é dada pela seguinte equação:

$$H_{bd}^d = I_c + I_{si} = H_d^d \left[A_I R_B + \frac{1}{2} (1 + \cos \mathbf{b})(1 - A_I) \right] \quad 4.10$$

Como o modelo de Hay não assume nenhuma contribuição para o efeito do brilho horizontal, Reindl et al. (1990) incorporam o termo proposto por Klucher no modelo de Hay. Assim, a irradiação difusa que atinge o plano inclinado assume a seguinte equação:

$$H_{bd}^d = H_d^d \left[A_I R_B + \frac{1}{2} (1 + \cos \mathbf{b})(1 - A_I)(1 + F \sin^3(\mathbf{b} / 2)) \right] \quad 4.11$$

Na equação acima, o primeiro termo entre colchete representa a contribuição circunsolar para a irradiação difusa, enquanto que o segundo termo representa a

irradiação difusa isotrópica corrigida pelo brilho horizontal. Em condições de céu nublado, o fator modulador e o índice anisotrópico tende a zero e o modelo reverte-se ao modelo isotrópico.

Utilizando o mesmo desenvolvimento de Hay (1979), Perez et al. (1986) consideram a irradiação difusa sendo composta pela soma das componentes isotrópica, circunsolar e o brilho horizontal. Na versão mais simples do modelo, sendo válida para superfícies com face inclinada para o Equador (Perez et al. 1987), a irradiação difusa circunsolar é considerada originar-se em um ponto no centro do disco solar, e toda energia devido ao brilho horizontal origina-se na região infinitesimal de (0°) de elevação. Assim a expressão de Perez et al. (1987) é escrita da seguinte maneira:

$$H_{bd}^d = H_d^d \left[\frac{1}{2} (1 + \cos \mathbf{b})(1 - F_1) + F_1 R_b + F_2 \sin(\mathbf{b}) \right] \quad 4.12$$

Onde, F_1 , representa a contribuição da irradiação difusa circunsolar e F_2 , é a contribuição da irradiação difusa horizontal. Esses dois parâmetros são considerados independentes um do outro, e são determinados empiricamente através de dados observacionais. Para tanto, o estado do céu é caracterizado, ao subdividir as condições atmosférica em um grande número de categorias, com a definição do índice de turbidez atmosférica [$\mathbf{e} = (H_d^d + H_b^d) / H_d^d$], que expressa a transição de céu totalmente nublado para condições de baixa turbidez atmosférica em condições de céu claro, sendo H_b^d a irradiação direta na normal, e o índice de brilho atmosférico ($\Delta = m_r H_d^d / H_0^d$), a variação de delta reflete a opacidade/espessura das nuvens e

$$m_r = \frac{1}{[\cos(q_z) + 0,15(93,885 - q_z)^{-1,253}]}, \text{ a massa óptica relativa do ar, Kasten (1966).}$$

Quadro 1 Intervalos de e para cada categoria.

Categorias de e	Intervalos de e
1	$e \leq 1,056$
2	$1,056 < e \leq 1,253$
3	$1,253 < e \leq 1,586$
4	$1,586 < e \leq 2,134$
5	$2,134 < e \leq 3,230$
6	$3,230 < e \leq 5,980$
7	$5,980 < e \leq 10,08$
8	$e > 10,080$

O estado do céu é caracterizado pela subdivisão de e em oito intervalos, Quadro (1). Para cada intervalo, através da técnica dos mínimos quadrados, usando dados observacionais, sé encontrado um conjunto de pares dos coeficientes F_1 e F_2 que são ajustados por regressão linear múltipla como função de q_z (em radianos) e Δ , através das seguintes expressões:

$$F_1 = F_{11} + F_{12} \Delta + F_{13} q_z \quad (4.13)$$

$$F_2 = F_{21} + F_{22} \Delta + F_{23} q_z \quad (4.14)$$

Os seis coeficientes F_{ij} , correspondentes para cada categoria de \mathbf{e} , calculados por Perez et al. (1987), estão dados no Quadro (2).

Quadro 2 Coeficientes F_1 e F_2 para cada categoria de \mathbf{e} , compilados de Perez et al. (1987).

Categorias de \mathbf{e}	F_{11}	F_{12}	F_{13}	F_{21}	F_{22}	F_{23}
1	0,041	0,621	-0,105	-0,004	0,074	-0,031
2	0,054	0,966	-0,166	-0,016	0,114	-0,045
3	0,227	0,866	-0,250	0,069	-0,002	-0,062
4	0,486	0,670	-0,373	0,148	-0,137	-0,056
5	0,819	0,106	-0,465	0,268	-0,497	-0,029
6	1,020	-0,260	-0,514	0,306	-0,804	0,046
7	1,009	-0,708	-0,433	0,287	-1,286	0,166
8	0,936	-1,121	-0,352	0,226	-2,449	0,383

De maneira geral, esses são os submodelos encontrados na literatura para estimar a irradiação difusa que atinge uma superfície inclinada. Sendo que, o modelo de Hay é o mais utilizado e modificado por outros pesquisadores. Willmott (1982), modifica o índice anisotrópico proposto por Hay, redefinindo esse índice, como a razão entre a irradiação direta na normal e a irradiação extraterrestre na horizontal, isto é, $(A_I = H_b^d / H_0^d)$, e utiliza a integração aproximada de Revfeim (1978) para a correção geométrica da radiação difusa isotrópica. Skartveit & Olseth (1986) também incluem o efeito do brilho horizontal no modelo de Hay, utilizando uma

parametrização diferente, para esse efeito, da utilizada por Reindl et al.(1990), e Gueymard (1987) dá um tratamento para o índice anisotrópico, em função das condições de nebulosidade da atmosfera.

Outros modelos dão tratamento diferenciado para o cálculo da irradiação direta que atinge a superfície inclinada, ao considerar que essa componente da irradiação global, é função da transmissividade atmosférica e do ângulo de incidência, Garnier & Ohmura (1970) sendo que as irradiações difusa e a refletida pelo solo têm a mesma formulação básica utilizada na maioria dos modelos. Aragon (1990), considera a irradiação global que atinge a superfície inclinada como dependente da transmissividade atmosférica, e não leva em conta o efeito da irradiação refletida pela superfície do solo.

Muitos autores utilizam os modelos descritos acima para validação em determinadas regiões geográficas. Utrillas et al. (1994), comparam o comportamento de vários submodelos de irradiação difusa usando três meses de dados horários na Espanha, obtidos com superfícies inclinadas orientadas em quatro posições diferentes (Leste, Oeste, Sul e Norte), e concluem que o modelo de Perez et al. tem resultados mais precisos para as condições atmosférica local. Kambezidis et al. (1994) também avaliam vários submodelos de irradiação difusa na Grécia, utilizando dezessete meses de dados horários obtidos para a superfície inclinada com a face voltada para o Equador, e concluem que o modelo de Hay (1979) apresenta a melhor desempenho para as condições atmosféricas local. Feuermann & Zemel (1992) avaliam os modelos de Perez et al., Hay e o de Liu & Jordan, com dados obtidos em Israel, com várias inclinações e azimute, concluem que o modelo de Perez et al. é significativamente melhor do que os outros dois modelos. Gopinathan (1990) usando dados horários obtidos na África do Sul para vários ângulos de inclinação, no período de um

ano, testa a desempenho dos modelos de Hay e de Liu e Jordan, e conclui que os dois modelos são equivalentes e recomenda a utilização do modelo de Liu e Jordan para ser aplicado na África do Sul devido a sua simplicidade.

Outros autores (Klein et al., 1976; Klein, 1977; Bugler, 1977; Notton et al., 1996; Behr, 1997) fazem uma extensão dos modelos de estimativa da irradiação total em uma superfície inclinada, para serem aplicados em regiões onde não existem tais observações. Esses modelos utilizam a irradiação global medida localmente em conjunto com modelos conceituais de irradiação difusa obtidos em outra localidade.

O propósito deste trabalho é verificar a desempenho desses modelos utilizando a irradiação global diária observada na superfície horizontal em conjunto com modelos conceituais de estimativa da irradiação difusa e da irradiação direta desenvolvidos localmente, e comparar os resultados com o modelo proposto obtido através de regressão linear entre as irradiações total medida na superfície inclinada e a global medida na superfície horizontal.

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Descrição do campo experimental e instrumentos de medidas

Os dados das irradiâncias solar direta e global para a superfície horizontal e da total em um plano inclinado, com inclinação igual á latitude local e com a face voltada para o Equador, foram coletados na Estação de Radiometria Solar da UNESP de Botucatu-SP (latitude $22^{\circ}51'$ Sul, longitude $48^{\circ}26'$ Oeste, altitude 786m), entre setembro de 1997 a agosto de 2001. As leituras foram feitas a cada segundo e os valores armazenados a média de 5 minutos dos dados, em um sistema de aquisição de dados da CAMPBELL SCIENTIFIC-INC modelo 21X. Ao redor de 9% dos dados foram desprezados na análise de consistência. Os modelos de estimativa da irradiação total na superfície inclinada foram avaliados, e o modelo de regressão linear desenvolvido, com os dados coletados no período, setembro de 1997 e agosto de 2000, (1034 dias), e os dados

compreendido no período setembro de 2000 a agosto de 2001, (332 dias) foram utilizados para validação dos modelos.



Figura 5.1 Estação de Radiometria Solar do Departamento de Recursos Naturais, UNESP.



Figura 5.2 Piranômetros na plataforma inclinada.

A irradiância direta na incidência normal foi obtida por meio de um pireliômetro EPPLEY-NIP, acoplado a um rastreador solar EPPLEY modelo ST-3, fixo na direção norte-sul geográfica e ajustado na latitude local. A irradiância global no plano horizontal foi obtida com auxílio de um piranômetro EPPLEY-PSP, posicionado num plano horizontal e, no plano inclinado irradiância foi obtida também com auxílio de um piranômetro EPPLEY-PSP, posicionado paralelamente sobre o plano inclinado.

A Figura 5.1 mostra a Estação de Radiometria Solar da UNESP, fotografia tirada da face norte para o sul. Os instrumentos estão fixada em uma superfície plana horizontal, no entanto, a Estação encontra-se em uma região com topografia em declive de oeste para leste. A análise da Figura mostra a existência de superfície do solo mais alta do que a altura dos instrumentos (lado oeste), o que pode contribuir para maior irradiância refletida nos instrumentos do que a

considerada neste trabalho. A Figura 5.2 mostra em detalhes o posicionamento dos piranômetros na plataforma inclinada, um para medidas da irradiância total e outro para medidas da irradiância difusa medida com anel de sombreamento.

5.2 Equações utilizadas para calcular a irradiância no topo da atmosfera

5.2.1 Irradiância no topo da atmosfera para uma superfície horizontal

Seguindo Iqbal (1983), na ausência de atmosfera a irradiância que incide em uma superfície horizontal é determinada pela seguinte expressão:

$$I_0 = I_{sc} E_0 \cos(q_Z) \quad 5.1$$

onde, I_0 é a irradiância no topo da atmosfera projetada na horizontal, I_{sc} é a constante solar igual a $(1367 \text{ W} / \text{m}^2)$, E_0 é o fator de correção da excentricidade da órbita terrestre e $\cos(q_Z)$ é o cosseno do ângulo zenital do Sol.

$$E_0 = 10^{-3}(1000,11 + 34,221 \cos \Gamma + 1,28 \sin \Gamma + 0,719 \cos 2\Gamma + 0,077 \sin 2\Gamma) \quad 5.2$$

$$\Gamma = 2p(DJ - 1) / 365,242 \quad 5.3$$

$$\cos(q_Z) = \sin d \sin f + \cos d \cos f \cos w \quad 5.4$$

$$d = 23,45 \text{ sen}[360/365(284 + DJ)] \quad 5.5$$

onde, d é a declinação solar, f é a latitude local e w é o ângulo horário e DJ é o dia Juliano (DJ=1,...366).

5.2.2. Irradiância no topo da atmosfera para uma superfície inclinada com a face voltada para o Equador

Na superfície inclinada com a face voltada para o Equador, a irradiância direta que incide nessa superfície depende do ângulo b de inclinação da superfície, em relação à superfície horizontal e do ângulo de incidência, q_b , dos raios solares nessa superfície.

A Figura 5.3 ilustra duas superfícies, no Hemisfério Sul, localizadas nas latitudes (f) e ($f + b$). A superfície na latitude f é inclinada com um ângulo b em relação à horizontal, enquanto que, a superfície na latitude $f + b$ é horizontal. Segundo Liu & Jordan (1961), citado por Iqbal (1983), a superfície inclinada e localizada na latitude f é paralela à superfície horizontal localizada na latitude $f + b$. Portanto, o ângulo zenital q_z , na latitude f é igual ao ângulo zenital q_b na latitude $f + b$. Em outras palavras, o ângulo de incidência dos raios solares na latitude f onde esta localizada a superfície inclinada com um ângulo b , é igual ao ângulo de incidência dos raios solares na superfície horizontal localizada na latitude $f + b$.

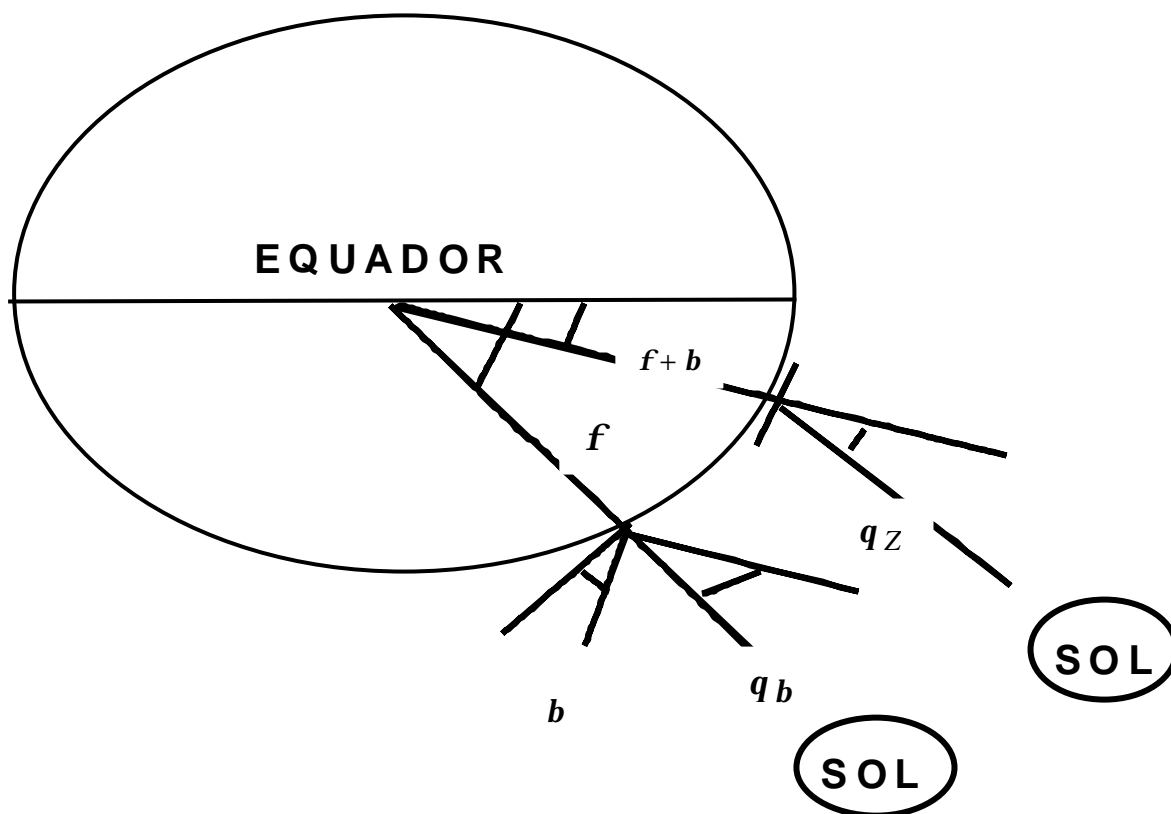


Figura 5.1. Esquema ilustrativo da igualdade dos ângulos q_z para a superfície horizontal na latitude $(f + b)$, e q_b para a superfície inclinada na latitude f .

Dessa maneira, a equação básica que determina a irradiância que incide em uma superfície inclinada, é a mesma utilizada para calcular a irradiância que incide em uma superfície horizontal, modificada apenas pelo ângulo de incidência dos raios solares através do ângulo zenital relativo á superfície inclinada (q_b), sendo determinada pela seguinte expressão:

$$I_{b0} = I_{sc} E_0 \cos(q_b)$$

5.6

onde I_{b0} é a irradiação no topo da atmosfera projetada na superfície inclinada e $\cos(q_b)$ é o cosseno do ângulo de incidência dos raios solares sobre a superfície inclinada dado por:

$$\cos(q_b) = \sin d \sin(f + b) + \cos d \cos(f + b) \cos w \quad 5.7$$

5.2.3 Fator de correção da irradiância na superfície inclinada em relação a superfície horizontal

Para se obter a irradiância no topo da atmosfera que incide em uma superfície inclinada a partir da irradiação no topo da atmosfera projetada na horizontal, é necessário substituir a Equação (5.1) na Equação (5.6), obtendo a seguinte expressão:

$$I_{b0} = I_0 \cos(q_b) / \cos(q_Z) \quad 5.8$$

Sendo que o fator de correção R_b é dado por:

$$R_b = \frac{\cos(q_b)}{\cos(q_Z)} = \frac{I_{b0}}{I_0} \quad 5.9$$

5.2.4 Irradiação no topo da atmosfera

A irradiação diária no topo da atmosfera para a superfície horizontal é obtida através da integração da curva de irradiância sendo dada por:

$$H_0^d = \int_{t_i}^{t_f} I_0 dt \quad 5.10$$

onde H_0^d é a irradiação diária no topo da atmosfera para a superfície horizontal, t_i e t_f são os tempos inicial e final do intervalo de integração, para valores diários de irradiação foi considerado o intervalo do nascer ao pôr do sol para obter o total diário de energia.

A irradiação diária no topo da atmosfera para a superfície inclinada é dada por:

$$H_{b0}^d = \int_{t_i}^{t_f} I_{b0} dt \quad 5.11$$

onde H_{b0}^d é a irradiação diária no topo da atmosfera para a superfície inclinada.

O fator de correção diário da irradiação na superfície inclinada em relação à superfície horizontal é dado por:

$$R_B = \frac{H_{b0}^d}{H_0^d} \quad 5.12$$

5.3 Irradiação ao nível da superfície

5.3.1 Irradiação direta na horizontal

A irradiação direta na horizontal (H_b^d) é obtida através da integração da curva de irradiância direta de incidência normal (I_b) projetada na horizontal.

$$H_b^d = \int_{t_i}^{t_f} I_b \cos(\mathbf{q}_Z) dt \quad 5.13$$

5.3.2 Irradiação global na superfície horizontal

A irradiação solar global (I_g) é registrada por um piranômetro fixo em uma base horizontal, e recebe a radiação solar e difusa de todo o hemisfério celeste, isto é, de horizonte a horizonte em todas as direções. A irradiância global no plano horizontal (H_g^d) é obtida através da integração da curva de irradiação global.

$$H_g^d = \int_{t_i}^{t_f} I_g dt \quad 5.14$$

5.3.3 Irradiação difusa na superfície horizontal

A irradiação difusa (H_d^d) de referência é obtida pela diferença entre as irradiações global e direta na horizontal.

$$H_d^d = H_g^d - H_b^d \quad 5.15$$

5.4 Irradiação total observada na superfície inclinada

A irradiação total diária observada na superfície inclinada (H_{bTO}^d) é obtida através da integração da curva de irradiância observada (I_{bt}), dada pela equação 5.16.

$$H_{bTO}^d = \int_{t_i}^{t_f} I_{bt} dt \quad 5.16$$

5.5 Estimativa da irradiação total em uma superfície inclinada

A irradiação total estimada H_{bT}^d , que incide em uma superfície inclinada em relação á horizontal, é dada pela soma das irradiações direta H_{bb}^d , difusa H_{bd}^d e a refletida pelo solo H_{br}^d , isto é:

$$H_{bT}^d = H_{bb}^d + H_{bd}^d + H_{br}^d \quad 5.17$$

5.5.1 Irradiação direta que incide na superfície inclinada

A irradiação direta que atinge a superfície inclinada é dada pela seguinte expressão:

$$H_{bb}^d = H_b^d R_B \quad 5.18$$

5.5.2 Irradiação refletida pelo solo que incide na superfície inclinada

Assumindo que a reflexão pela superfície do solo seja isotrópica, a fração da energia refletida que incide sobre o plano inclinado é dada por:

$$H_{br}^d = H_g^d r F_{cg} \quad 5.19$$

onde $r=0,26$ é o albedo da superfície definido como a radiação refletida por uma superfície sobre a radiação incidente na superfície.

Devido á inclinação da superfície, apenas uma fração da radiação refletida pelo solo atinge o plano inclinado; assim, essa fração, dada por F_{cg} , que é o fator de configuração

entre o plano inclinado e o solo, por definição, é a razão entre a radiação incidente no plano inclinado e a radiação refletida pelo solo.

Segundo Iqbal (1983) o fator de configuração entre o plano inclinado e o solo é dado por:

$$F_{cg} = \frac{1}{2}(1 - \cos \mathbf{b}) \quad 5.20$$

Dessa maneira, a equação final para a irradiação refletida pelo solo e recebida pelo plano inclinado é dada por:

$$H_{br}^d = H_g^d \mathbf{r} \frac{1}{2}(1 - \cos \mathbf{b}) \quad 5.21$$

5.5.3 Irradiação difusa que incide na superfície inclinada

O tratamento matemático mais comum para calcular a irradiação difusa presume que esta tenha comportamento isotrópica. Seguindo o procedimento adotado para calcular a irradiação refletida pelo solo, Iqbal (1983) deduz a seguinte equação para o cálculo da irradiação difusa no plano inclinado:

$$H_{\mathbf{b}}^d = H_d^d \frac{1}{2}(1 + \cos \mathbf{b}) \quad 5.22$$

Essa expressão no tratamento da irradiação difusa é comum a todos os modelos de estimativa da irradiação total numa superfície inclinada, sendo apenas modificada para incluir as componentes, circumsolar e brilho horizontal, da irradiação difusa. O termo, $F_{gc} = \frac{1}{2}(1 + \cos \mathbf{b})$ é o fator de configuração entre o plano inclinado e o hemisfério celeste. Esse fator representa a fração da irradiação difusa vinda do céu que atinge a superfície inclinada.

5.6 Modelos modificados de estimativa da irradiação total

As medidas de irradiação global na superfície horizontal, em valores horários ou diários são feitas em várias localidades, o mesmo não ocorre para as medidas da irradiação total em uma superfície inclinada. No entanto, a avaliação da irradiação total na superfície inclinada é de fundamental importância na estimativa da radiação absorvida por superfícies topográficas com inclinação natural, ou superfícies com inclinação forçadas, como é o caso de aquecedores solares.

Com a finalidade de estimar a irradiação incidente sobre superfícies inclinadas com a face voltada para o Equador, é testado um modelo matemático simples de estimativa, que utiliza apenas a irradiação solar global observada na superfície horizontal em conjunto com modelos conceituais de estimativa da irradiação difusa e da irradiação direta .

Utilizando as Equações (5.17, 5.21 e 5.22), escrevemos o modelo isotrópico de Liu & Jordan (1963), para a estimativa da irradiação total em uma superfície inclinada da seguinte maneira:

$$H_{bT}^d = (H_g^d - H_d^d)R_B + H_g^d r \frac{1}{2}(1 - \cos \mathbf{b}) + H_d^d \frac{1}{2}(1 + \cos \mathbf{b}) \quad 5.23$$

Como sugerido por Klein et al. (1976), dividindo a Equação (5.23) pela irradiação global medida na horizontal (H_g^d), a Equação (5.23) pode ser escrita da seguinte maneira:

$$H_{bT}^d = H_g^d \left[(1 - K_d)R_B + r \frac{1}{2}(1 - \cos \mathbf{b}) + K_d \frac{1}{2}(1 + \cos \mathbf{b}) \right] \quad 5.24$$

onde $K_d = \frac{H_d^d}{H_g^d}$, é a razão entre as irradiações difusa e a global na superfície horizontal.

A irradiação difusa é uma variável importante na componente da radiação solar que atinge a superfície da Terra. No entanto, medidas das mesmas não são feitas em tantas localidades quanto às medidas da irradiação global, o que leva ao desenvolvimento de modelos conceituais para estimar a irradiação difusa em uma dada localidade, e aplicá-los em outra localidade onde não existem dados observacionais.

O procedimento básico no desenvolvimento de modelos que servem para estimar a irradiação difusa é ajustar através de regressão linear, as medidas de irradiação global com a componente difusa, medidas em uma mesma localidade, e então aplicar o resultado obtido nas localidades onde não existem medidas da componente difusa. Esses ajustes são freqüentemente apresentado por meio da fração difusa (K_d) com o índice de claridade $K_t = H_g^d / I_0$, razão

entre as irradiações global e no topo da atmosfera. Normalmente, o ajuste é do tipo polinomial, utilizando polinômios com vários graus, e pode ser escrito da seguinte maneira:

$$K_d = \sum_{j=1}^n b_j (K_t)^j \quad 5.25$$

onde, b_j são as estimativas dos parâmetros da regressão, e n é o grau do polinômio.

São exemplos de regressão linear múltipla que relacionam a fração da irradiação difusa com o índice de claridade os trabalhos de (Liu & Jordan, 1960; Klein et al., 1976; Erbs et al., 1982; Ricieri, 1998; Oliveira et al. 2002).

A Equação (5.23) também pode ser escrita em função da fração da irradiação direta contida na irradiação global da seguinte maneira:

$$H_{dT}^d = H_g^d [K_{BH} R_B + r \frac{1}{2} (1 - \cos \theta) + (1 - K_{BH}) \frac{1}{2} (1 + \cos \theta)] \quad 5.26$$

onde, $K_{BH} = \frac{H_b^d}{H_g^d}$, é a razão entre as irradiações direta projetada na superfície horizontal e a

global na superfície horizontal.

A irradiação direta é estimada através de regressão linear múltipla entre a fração da componente direta contida na global (K_{BH}) e o índice de claridade (K_t), essa relação

também é do tipo polinomial e pode ser escrita da seguinte maneira:

$$K_{BH} = \sum_{i=1}^n b_i (K_t)^i \quad 5.27$$

onde b_i são as estimativas dos parâmetros da regressão, n é o grau do polinômio.

São exemplos de regressão linear que relacionam a fração da irradiação direta com o índice de claridade os trabalhos de (Gueymard, 1993; Feuermann & Zemel, 1991).

Todos os outros modelos descritos neste trabalho foram modificados de maneira similar às modificações feitas no modelo de Liu & Jordan.

5.7 Modelo estatístico para estimar a irradiação total

As modificações feitas nos modelos de estimativa da irradiação total na superfície inclinada exigem o conhecimento das componentes da irradiação difusa ou da direta.

Uma possível maneira de evitar o uso dessas componentes da irradiação solar é ajustar através de regressão linear, a irradiação total que incide na superfície inclinada com as variáveis que influenciam em seu comportamento.

Devido ao fato que, durante o outono e inverno, a energia recebida pela superfície inclinada é maior do que a recebida pela superfície horizontal, e durante a primavera e verão, a quantidade de energia recebida pela superfície inclinada é menor do que a recebida pela superfície horizontal, procurou-se no desenvolvimento do modelo estatístico eliminar a variação

sazonal relacionando a razão entre a irradiação total e a irradiação global medidas na superfície

$(RBS = \frac{H_{bTO}^d}{H_g^d})$ com a razão das mesmas variáveis calculadas no topo da atmosfera (R_B), e

com o índice de claridade K_t que representa a cobertura de nuvens. Dessa maneira, o modelo

estatístico a ser obtido com o ajuste feito através de regressão linear tem a seguinte forma:

$$RBS = a + b R_B + c K_t \quad 5.28$$

Onde a, b e c são as estimativas dos parâmetros da regressão.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Níveis de irradiação extraterrestre nas superfícies horizontal e inclinada.

A irradiação extraterrestre diária projetada nas superfícies horizontal e inclinada, com ângulo ($22,85^\circ$) de inclinação, igual ao da latitude local, e com face voltada para o Equador no Hemisfério Sul, está mostrada na Figura (6.1). Nota-se que existe grande variação anual da energia recebida pela superfície horizontal, com pico mínimo de energia durante o inverno e máximo durante o verão, e com pouca a variação anual de energia recebida pela superfície inclinada, com pico mínimo também durante o inverno e dois máximos durante o equinócio, sendo que, a irradiação recebida na superfície horizontal é maior do que a recebida pela superfície inclinada durante os meses de verão e da primavera, e menor durante os meses de outono e inverno.

A maior quantidade de radiação recebida pela superfície inclinada durante o outono e inverno, é devido a sua maior exposição aos raios solares do que a superfície horizontal

principalmente devido a incidência da irradiação direta, que é maior do que a recebida na superfície horizontal, e também ao maior tempo de exposição durante o fotoperíodo. O inverso ocorre, durante os meses de verão e primavera, isto é, a superfície inclinada recebe menos radiação solar do que a superfície horizontal, devido a menor exposição aos raios solares e também ao menor tempo de exposição durante o fotoperíodo.

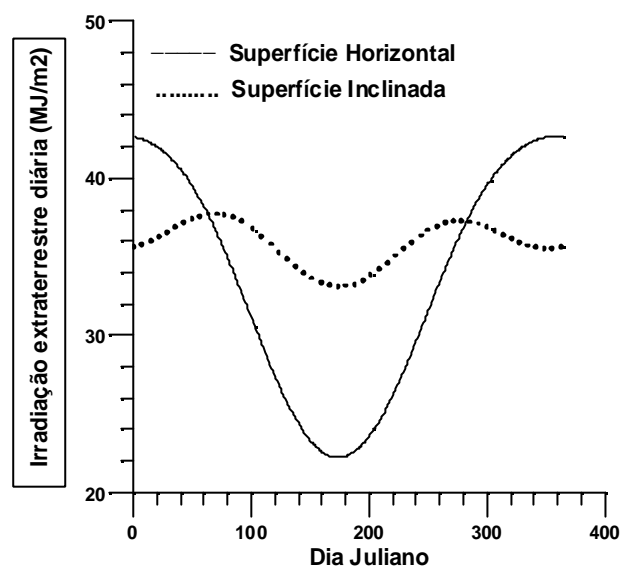


Figura 6.1. Irradiação extraterrestre diária projetada nas superfícies inclinada e horizontal, em relação ao dia do ano.

6.1.1 Distribuição de desvio relativo

Com o objetivo de avaliar os percentuais relativos durante o ano, entre a irradiação extraterrestre projetada nas superfícies horizontal e inclinada, fez-se uso da expressão

(6.1), que considera a irradiação extraterrestre projetada na superfície inclinada como sendo a de referência.

$$d\% = \frac{(H_{b0}^d - I_0)}{H_{b0}^d} 100 \quad (6.1)$$

O desvio em porcentagem, calculado para a irradiação extraterrestre diária considerando o plano inclinado como sendo de referência em relação ao plano horizontal, está mostrado na Figura (6.2). O desvio máximo positivo em torno de 32%, ocorre durante o final do mês de junho, e o mínimo negativo próximo de -19 % ocorre no final do mês de dezembro e início de janeiro.

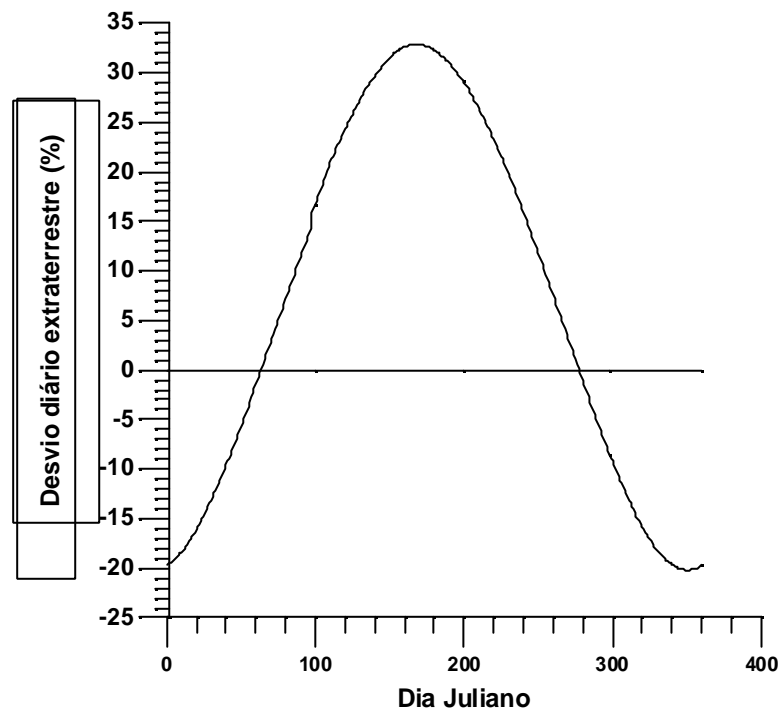


Figura 6.2. Desvio relativo considerando a irradiação extraterrestre diária calculada nas superfícies inclinada e horizontal, em relação ao dia do ano.

Em outras palavras, quando se considera uma superfície inclinada com a face voltada para o Equador, existe um ‘ganho’ relativo de energia durante os meses de outono e inverno e uma ‘perda’ relativa durante os meses da primavera e verão, isso representa grandes vantagens para alguns propósitos práticos, como por exemplo, no caso de aquecedores solares, permite ter melhor redistribuição e aproveitamento da energia solar durante o ano.

Em termos de valores absoluto, isto é, a diferença entre os valores calculados para as superfícies inclinada e horizontal, Figura (6.3). Nota-se que a diferença da irradiação extraterrestre tem um máximo de $10,6 \text{ MJ}/\text{m}^2$ por dia no final de junho e um mínimo de $-6.7 \text{ MJ}/\text{m}^2$ no final de dezembro e início de janeiro.

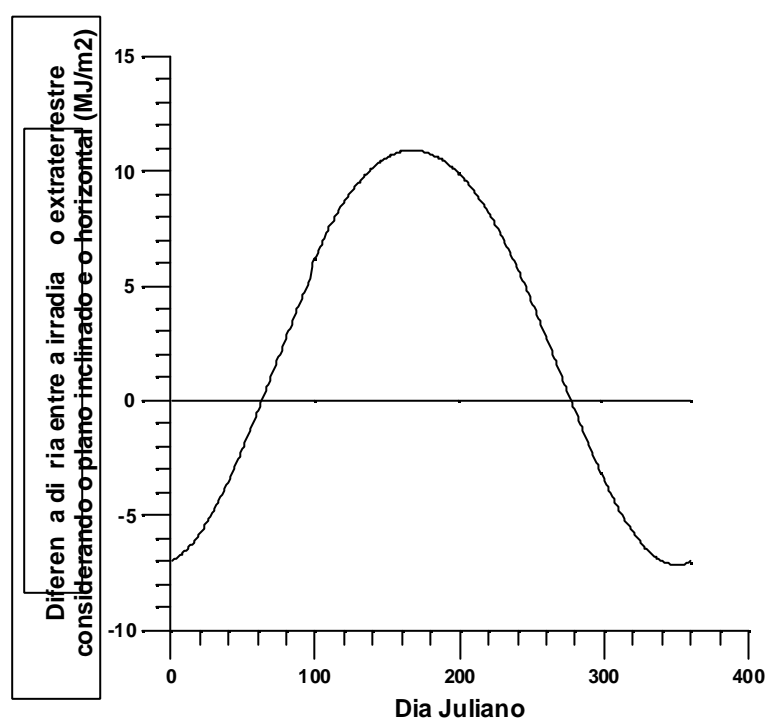


Figura 6.3. Diferença entre a irradiação extraterrestre diária calculada, considerando as superfícies inclinada e horizontal, em relação ao dia do ano.

6.2 Níveis de irradiação observada nas superfícies horizontal e inclinada.

Com a finalidade de comparar a irradiação observada próximo a superfície do solo, nas superfícies horizontal e inclinada, foram utilizadas, 337 dias de observações feitas durante o ano de 1998.

A Figura (6.4) mostra o desvio em porcentagem calculado para a irradiação observada considerando o plano inclinado como sendo a referência em relação ao plano horizontal. O comportamento do desvio para os dados observacionais é similar aos calculados para a irradiação extraterrestre, excetuando-se a grande variabilidade que ocorre diariamente devido à presença da atmosfera que é responsável pela alternância de dias com céu claros e nublados. No caso dos valores observados, verifica-se o mesmo comportamento encontrado para a irradiação extraterrestre, isto é, durante os meses de outono e inverno o plano inclinado recebe mais radiação do que o plano horizontal, tendo um 'ganho' máximo em torno de 30% e durante os meses da primavera e verão, recebe uma quantidade menor de radiação atingindo uma 'perda' relativa mínima em torno de -15%.

Em termos de valores absolutos, Figura (6.5), principalmente durante o inverno os valores máximos diários são ao redor de $6 \text{ MJ}/\text{m}^2$, e os valores mínimos observados durante o verão são ao redor de $-4 \text{ MJ}/\text{m}^2$. Nota-se ainda, nas Figuras, que mesmo durante o outono e inverno existem valores negativos, isso é devido à ocorrência de dias com céu totalmente nublado, e a irradiação que atinge as duas superfícies é praticamente em sua totalidade composta pela irradiação difusa; no entanto, devido à inclinação da superfície, ela não recebe toda a radiação que é espalhada e que atinge a superfície horizontal.

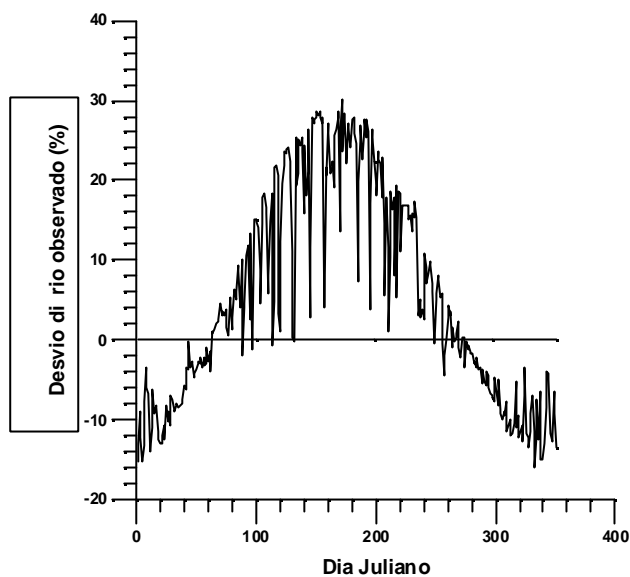


Figura 6.4. Desvio relativo considerando a irradiação diária medida nas superfícies inclinada e horizontal, durante o ano de 1998.

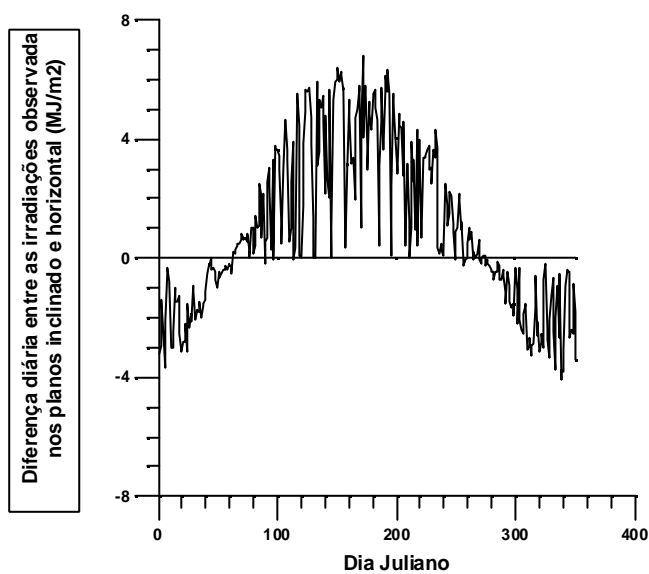


Figura 6.5. Diferença entre a irradiação diária medida nas superfícies inclinada e horizontal, durante o ano de 1998.

Para uma melhor interpretação dos resultados observados, foi eliminado o problema causado pela alternância dos dias com céu nublado e claro, através das médias mensais de energia para as irradiações observadas nas superfícies inclinada e na horizontal. Na Figura (6.6) são mostradas as médias mensais de energia recebida nas superfícies inclinada e horizontal durante o ano de 1998. De maneira geral, a energia recebida pelo plano inclinado tem pouca variabilidade anual, enquanto que a energia recebida pelo plano horizontal apresenta um pico mínimo acentuado durante o inverno, sendo menor do que a recebida no plano inclinado durante os meses de outono e inverno e maior durante os meses da primavera e verão, e praticamente iguais nos meses de março e outubro.

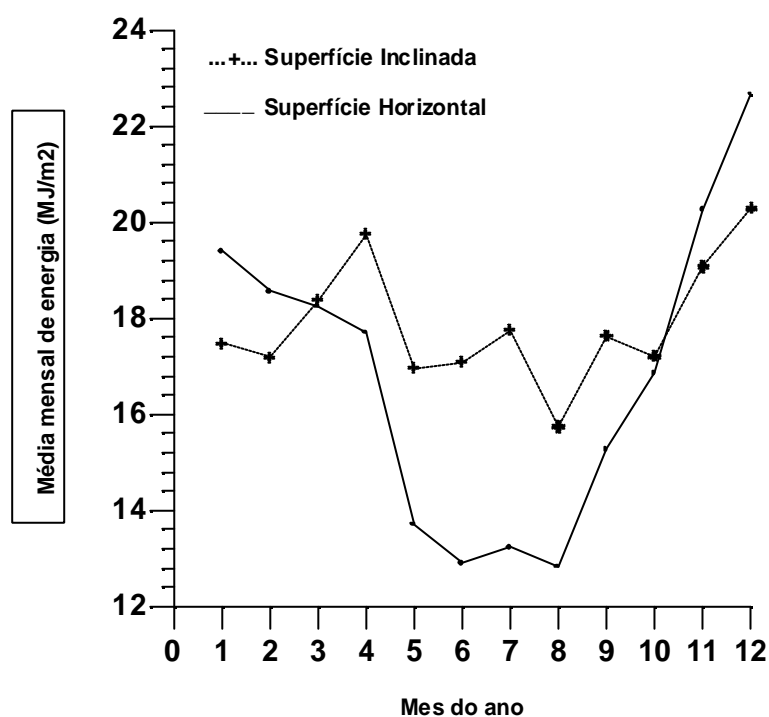


Figura 6.6. Média mensal observada da irradiação recebida nas superfícies inclinada e horizontal, no ano de 1998.

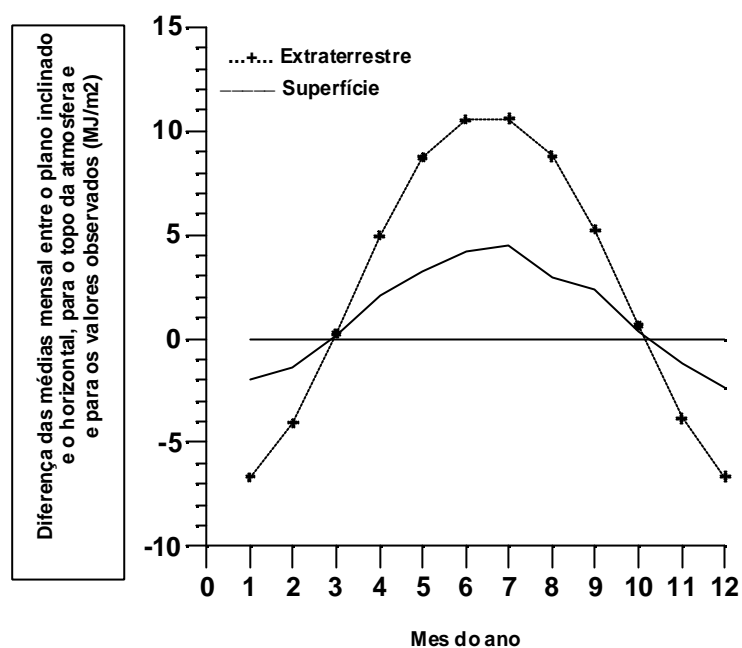


Figura 6.7. Diferença mensal de energia entre as superfícies inclinada e a horizontal para os valores observados e para os valores extraterrestre calculados, durante o ano de 1998.

Para verificar o ‘ganho’ mensal de energia pela superfície inclinada durante os meses de outono e inverno, e a ‘perda’ de energia durante a primavera e verão, foi feita a diferença mensal da energia recebida entre as superfícies inclinada e horizontal, e para os valores calculados da irradiação extraterrestre nas duas superfícies. O resultado está mostrado na Figura (6.7). Observa-se que durante o inverno o ‘ganho’ relativo mensal para a irradiação extraterrestre tem um máximo em torno de $10 \text{ MJ}/\text{m}^2$, e a ‘perda’ relativa mínima em torno de $-8 \text{ MJ}/\text{m}^2$ durante o verão. Similarmente, o mesmo ocorre com os valores observados próximo a superfície do solo, sendo que o ‘ganho’ máximo observado é em torno de $3,5 \text{ MJ}/\text{m}^2$ durante o inverno, e a ‘perda’ mínima observada é de aproximadamente de $-2 \text{ MJ}/\text{m}^2$ durante o verão. A discrepância encontrada entre a diferença dos valores extraterrestres e observados próximo a superfície é devida a

existência da reflexão da energia solar pelos gases que compõem a atmosfera e à cobertura de nuvens.

6.3 Avaliação dos modelos de estimativa da irradiação total na superfície inclinada.

6.3.1 Estimativa da irradiação total diária

Na estimativa da irradiação total diária foram utilizados os dados coletados no período compreendido entre setembro de 1997 e agosto de 2000, do total de valores observados, utilizou-se somente 1034 dias. As irradiações direta, global e difusa na superfície horizontal, e a irradiação total na superfície inclinada, com ângulo de inclinação igual ao da latitude local, foram obtidas através da integração, desde o nascer até o pôr do Sol, das respectivas curvas de irradiação.

Nos modelos de estimativa da irradiação total em uma superfície inclinada, encontrados na literatura, o tratamento dado para as irradiações direta e a refletida pela superfície do solo é praticamente comum a todos eles; a diferença encontrada está na porção da irradiação difusa que atinge a superfície inclinada.

A Figura (6.8-A) ilustra resultados típicos da aplicação do modelo de Liu & Jordan (1963) para estimar a radiação que incide em um sensor sobre um plano inclinado. A análise indica que o modelo tem pouca dispersão dos valores estimados quando existem condições de baixa intensidade de irradiação, isto é, valores diários menores do que ao redor de $10 \text{ MJ}/\text{m}^2$. Isso é esperado porque a baixa intensidade da irradiação global está principalmente associada com a

ocorrência de condições de céu nublado, com pouca irradiação direta e a irradiação difusa vinda do céu apresenta comportamento uniforme, ou seja isotrópica, e a correção da irradiação difusa observada na superfície horizontal para a superfície inclinada, é apenas devido ao fator geométrico $0,5 \cdot (1 + \cos(\mathbf{b})) = 0,96$. Contudo, para os valores de irradiação maiores do que ao redor de 10 MJ/m^2 , condição de céu parcialmente nublado ou claro, o modelo de Liu & Jordan subestima a quantidade da irradiação difusa que incide sobre a superfície inclinada, principalmente em condições de céu claro devido ao fato que a maior porcentagem da irradiação difusa é proveniente do disco solar, ou seja a componente circunsolar. Esse resultado, claramente demonstra que o modelo isotrópico é deficiente na estimativa da irradiação total em uma superfície inclinada em condições de céu parcialmente nublado ou claro, devido principalmente ao comportamento anisotrópico da irradiação difusa, sendo necessário que a correção seja maior do que a simples correção geométrica.

A Figura (6.8-C) mostra o diagrama de dispersão para os valores estimados da irradiação total na superfície inclinada, obtidos com o modelo proposto por Hay (1979). Nota-se que existe pouca dispersão dos valores estimados da irradiação total em comparação com os valores observados para todas as condições atmosféricas. Esse resultado demonstra que a introdução do índice anisotrópico ($A_I = H_{bh}^d / H_0^d$) no modelo, para caracterizar o estado do céu, e subdividir a irradiação difusa nas componentes circunsolar e isotrópica ponderadas por esse índice, produz excelentes resultados na estimativa da irradiação total em uma superfície inclinada. Em condições de céu claro, o índice anisotrópico tende a 1 e a componente circunsolar da irradiação difusa ponderada por esse índice tem um peso maior do que a difusa isotrópica, em condições de céu nublado, o índice anisotrópico tende a zero, e praticamente toda a irradiação difusa é tratada como isotrópica.

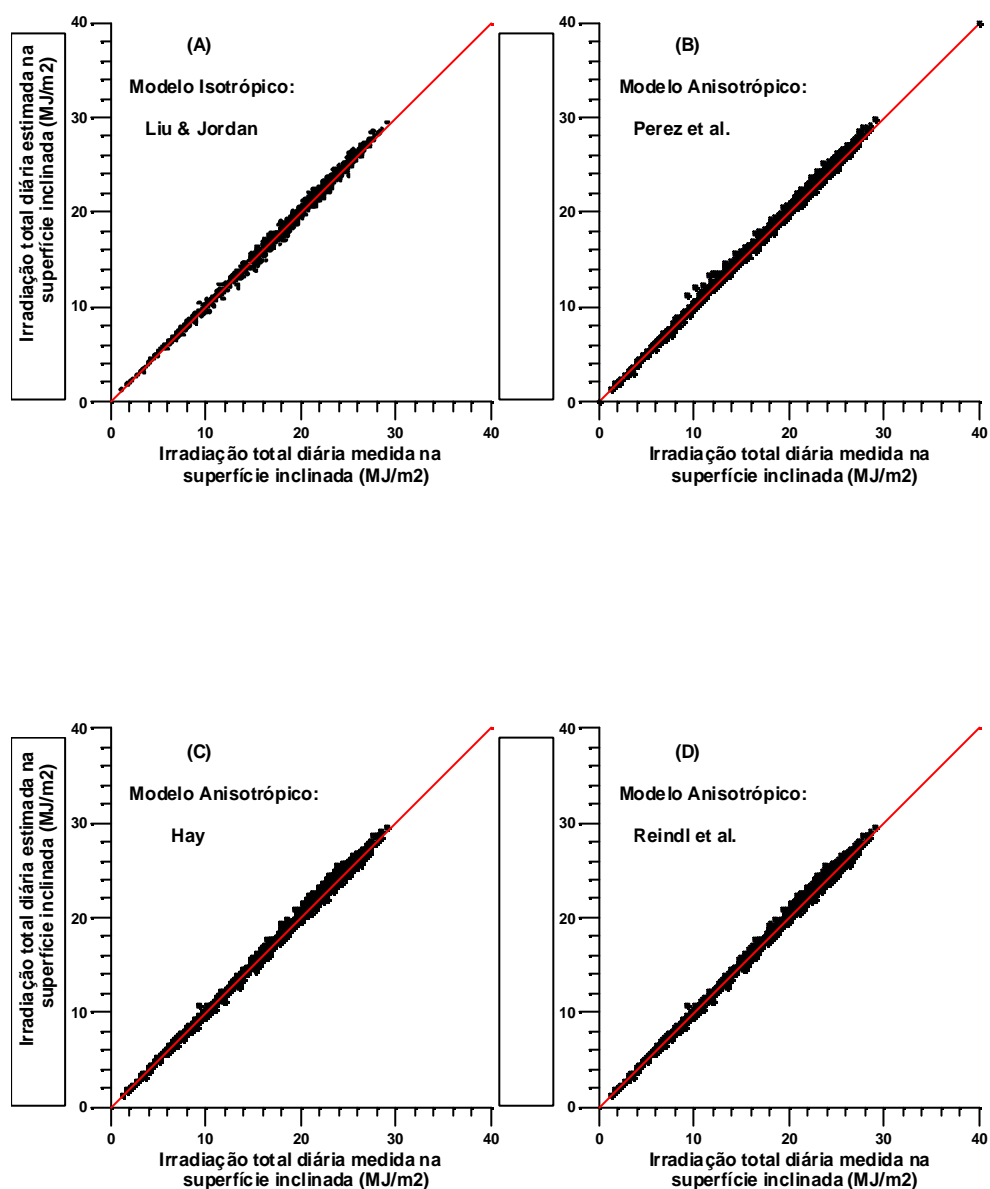


Figura 6.8. Distribuição da Irradiação total diária no plano inclinado estimada através dos modelos, Liu & Jordan (A), Perez et al. (B), Hay (C) e Reindl et al. (D), em função dos valores observados. A linha contínua é a reta de 45°.

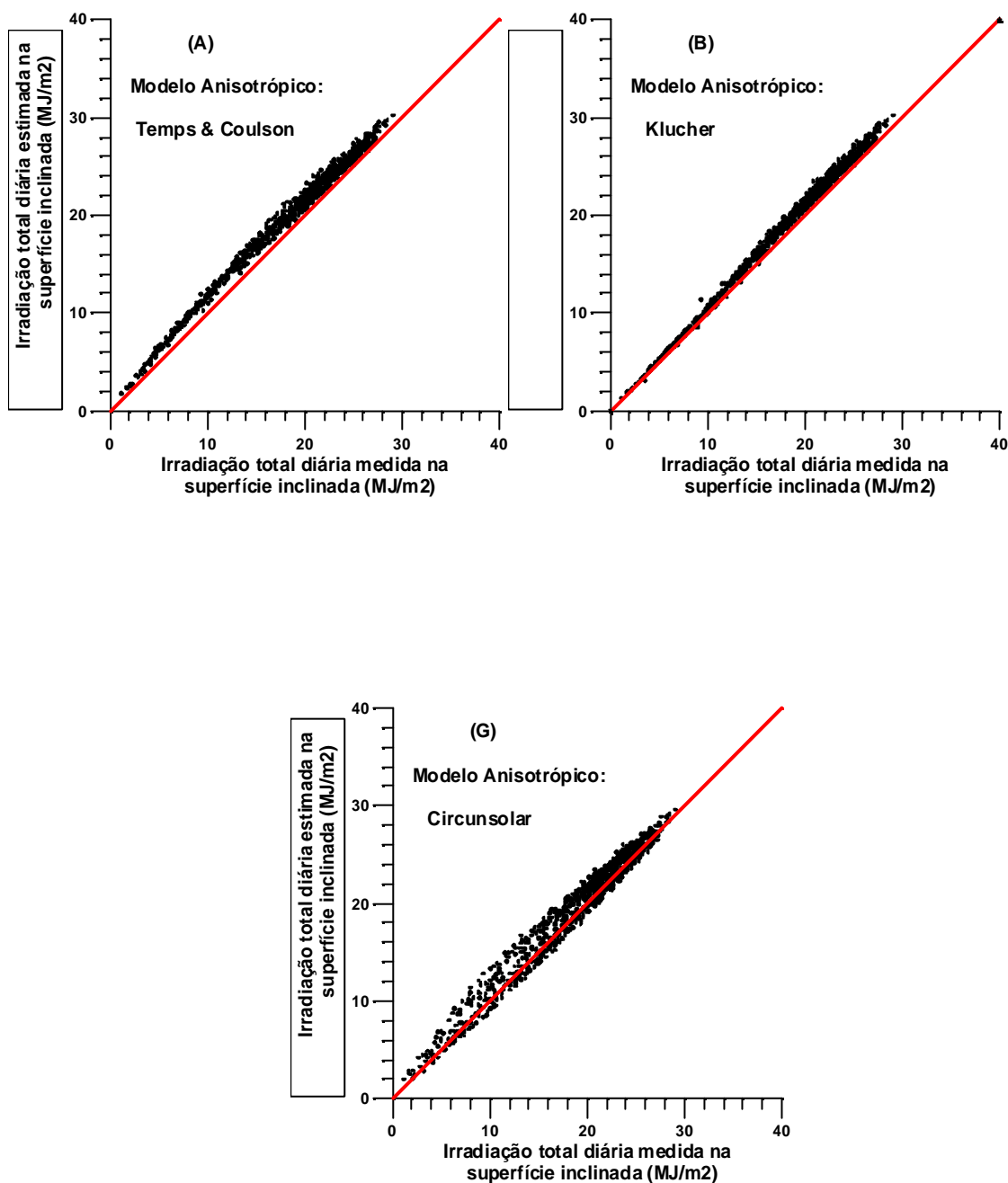


Figura 6.9. Distribuição da Irradiação total diária no plano inclinado estimada através dos modelos, Temps & Coulson (A), Klucher (B) e Circunsolar (C), em função dos valores observados. A linha contínua é a reta de 45°.

Como o modelo de Hay não incorpora os efeitos do brilho horizontal, Reindl et al. (1990), incorporaram esse efeito ao introduzirem o termo proposto por Temps & Coulson e modificado por Klucher no modelo de Hay. Os resultados obtidos com o modelo de Reindl et al., estão mostrados na Figura (6.8-D). Nota-se que a dispersão para os valores estimados da irradiação total na superfície inclinada é bastante similar aos obtidos com o modelo do Hay. A simples visualização do diagrama de dispersão não permite notar se foram obtidas melhorias significativas com o modelo.

Na formulação matemática do modelo de Perez et al. (1987), são incluídas as subcomponentes da irradiação difusa, circunsolar, isotrópica e brilho horizontal. Os resultados obtidos com o modelo de Perez et al. (1987) estão mostrados na Figura (6.8-B). Nota-se que de maneira geral, esse modelo superestima os valores da irradiação total na superfície inclinada principalmente em condições de céu parcialmente nublado e claro, contudo, com menor dispersão dos valores estimados em comparação aos outros modelos.

A Figura (6.9-A) mostra o diagrama de dispersão para os valores estimados da irradiação total na superfície inclinada, obtidos com o modelo proposto por Temps & Coulson (1977), que é uma modificação do modelo isotrópico de Liu & Jordan, ao incluir empiricamente fatores para corrigir a irradiação difusa composta pelo brilho horizontal e circunsolar. Verifica-se que, de maneira geral, o modelo superestima a irradiação total para todas as condições de céu, variando de céu claro a nublado. Sendo que, o modelo apresenta melhor concordância com os dados observacionais para os dias de céu claro, altos valores de irradiação, que é a essência desse modelo, deixando a desejar para os dias de céu nublado ou parcialmente nublado, valores baixos e intermediários de irradiação, respectivamente. O fato do modelo de Temps & Coulson superestimar

os valores de irradiação no plano inclinado, provavelmente é devido à utilização do fator $[1 + \cos^2(\mathbf{q}_b) \text{sen}^3(\mathbf{q}_Z)]$, que contribui para a irradiação difusa circunsolar, ter sido usado como média diária do cosseno do ângulo zenital, quando em verdade esse termo é sensível a variações instantâneas da irradiância, ou para a irradiação calculada para pequenos intervalos de tempo, por exemplo, valores horários de irradiação.

Na tentativa de obter um modelo universal, isto é, que possa ser aplicado sob quaisquer condições atmosférica, com o céu variando de claro a nublado, Klucher (1979) propôs que os termos de brilho horizontal e circunsolar, empiricamente determinados por Temps & Coulson sejam multiplicados por um fator moderador $[F = 1 - (K_d)^2]$ que considera a variabilidade da atmosfera.

A Figura (6.9-B) mostra o diagrama de dispersão para os valores estimados da irradiação total na superfície inclinada, obtidos com o modelo proposto por Klucher (1979).

Nota-se que, ao aplicar o fator moderador mesmo para valores diários, o modelo de Klucher corrige sistematicamente os valores estimados de irradiação total diária, obtidos com o modelo de Temps & Coulson, para todas as condições características de céu.

Essa constatação indica que a caracterização do estado do céu é um importante fator a ser considerado nos modelos de estimativa da irradiação total que incide em uma superfície inclinada, sendo um fator considerado nos modelos de Hay, Reindl e Perez et al..

A Figura (6.9-C) mostra a irradiação total estimada que atinge o plano inclinado considerando o modelo anisotrópico circunsolar. Observa-se, que quando a estimativa é feita com esse modelo, existe grande dispersão dos valores calculados em relação aos observados, para todas condições de céu, variando de claro a nublado. Essa dispersão ocorre porque a

irradiação difusa é corrigida indistintamente sem considerar as condições de nebulosidade atmosférica, e o fator de correção é grande principalmente durante o inverno e pequeno durante o verão, como pode ser visto na Figura (6.10), que mostra os valores diários de R_B durante ano. Portanto, quando se considera que a irradiação difusa tem origem somente no disco solar, obtêm-se péssimos resultados na estimativa da irradiação total que atinge a superfície inclinada.

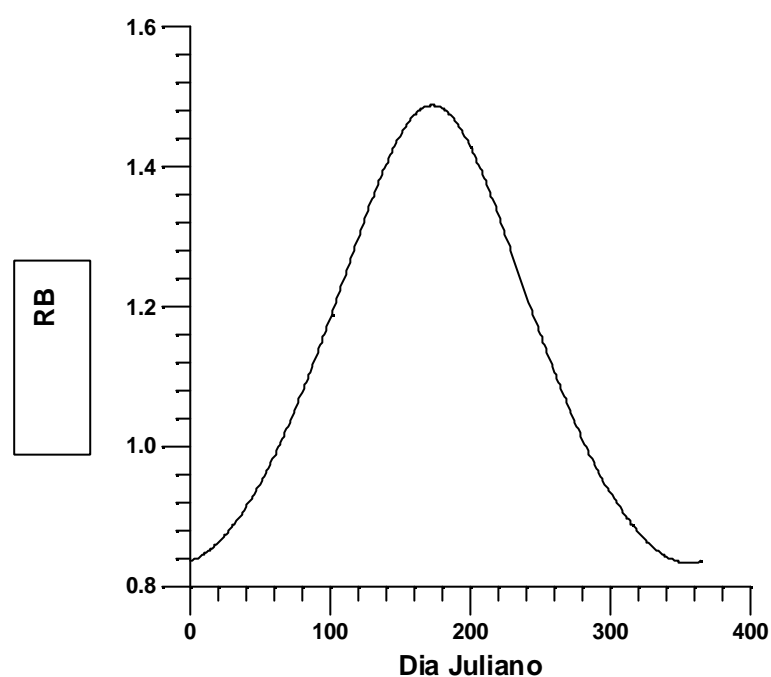


Figura 6.10. Valores diários de R_B em função do dia do ano.

Analisando os diagramas de dispersão, nota-se que de maneira geral os modelos: circunsolar, Temps & Coulson e o de Klucher apresentam os piores resultados na estimativa da irradiação total que incide na superfície inclinada, enquanto que os modelos: Liu & Jordan, Hay, Reindl et al. e o de Perez et al. apresentam os melhores resultados. Entretanto, através da simples visualização dos diagramas de dispersão, não é possível saber qual é o melhor modelo. Dessa maneira, é necessário usar a avaliação estatística para uma melhor compreensão, avaliação e

interpretação dos resultados obtidos com os vários modelos de estimativa da irradiação total em uma superfície inclinada.

6.3.1.1 Erro quadrático médio e Erro médio

Uma maneira de verificar estatisticamente o grau de dispersão dos valores estimados de irradiação para cada modelo é calcular o erro quadrático médio (EQM), e o erro médio (EM) que está associado à tendência geral de subestimar ou superestimar os valores estimados. As equações para calcular o EQM e EM, em %, são dadas abaixo:

$$EQM = 100. \frac{1}{\bar{X}} \left[\frac{1}{N} \sum_{I=1}^N (X_{EST} - X_{MED})_I^2 \right]^{\frac{1}{2}} \% \quad 6.2$$

$$EM = 100. \frac{1}{\bar{X}} \left[\frac{1}{N} \sum_{I=1}^N (X_{EST} - X_{MED})_I \right] \quad 6.3$$

onde, X_{EST} é o valor estimado de qualquer variável, e X_{MED} é o valor medido da mesma variável, \bar{X} é o valor médio de X_{MED} e N é o número variáveis.

O Quadro 3 mostra os valores de EQM e EM para os vários modelos de estimativa da irradiação total diária na superfície inclinada.

Quadro 3. Valores de EQM e EM, em porcentagem para a irradiação total diária estimada com os vários modelos.

Modelos	EQM (%)	EM (%)
Liu & Jordan (1963)	2,56	-1,29
Hay (1979)	2,43	0,91
Reindl et al. (1990)	2,46	1,03
Perez et al. (1987)	2,48	1,28
Klucher (1979)	5,39	4,65
Temps & Coulson (1977)	7,89	7,30
Circunsolar	6,42	3,20

Comparando os valores de EM entre os vários modelos, nota-se que, excetuando-se o de Liu & Jordan que subestima os valores da irradiação diária na superfície inclinada (-1,29 %), todos os outros superestimam os valores, sendo que os modelos de Temps & Coulson, Klucher e o circunsolar, são os que mais superestimam os valores da irradiação na superfície inclinada, por apresentarem os maiores valores de EM. Os modelos de Perez et al., Hay e Reindl et al., apresentam os menores valores de EM, ou as menores superestimativas dos valores da irradiação total diária na superfície inclinada. Comparando os valores de EQM obtidos para os vários modelos nota-se que o grau de dispersão dos valores estimados da irradiação total na superfície inclinada são extremamente elevados para os modelos de Temps & Coulson, circunsolar e Klucher, quando

comparados com os modelos de Perez et al., Hay, Reindl et al. e Liu & Jordan; portanto, esses são os melhores modelos de estimativa para a irradiação total diária por apresentarem menor dispersão e superestimativa ou subestimativa dos valores estimados em comparação com os observados. O modelo de Hay apresenta os menores erros, sendo portanto o melhor modelo para estimar a irradiação total diária em uma superfície inclinada, já que Reindl et al. ao introduzirem o efeito do brilho horizontal no modelo de Hay, não obtêm melhorias significativas na estimativa da irradiação total.

6.4 Estimativa da irradiação total diária com os modelos modificados

Os modelos modificados de estimativa da irradiação total em uma superfície inclinada exigem o conhecimento da irradiação global medida na superfície horizontal e da irradiação difusa na horizontal estimada através de modelos conceituais que correlacionam a componente difusa, através da fração difusa (K_d), com a irradiação global através do índice de claridade K_t , isto é, $K_d = f(K_t)$, ou o conhecimento da irradiação direta na horizontal estimada através de modelos conceituais que correlacionam a componente direta, através da fração direta (K_{BH}), com a irradiação global através do índice de claridade K_t , isto é, $K_{BH} = f(K_t)$.

6.4.1 Modelos conceituais de estimativa das irradiações difusa e direta.

Os modelos conceituais de estimativa das irradiações difusa e da direta baseados no índice de claridade são chamados do tipo Liu-Jordan, desde que esses autores foram os primeiros a proporem tal correlação, Liu & Jordan (1960). Esse tipo de correlação é encontrado em

diversos trabalhos para diferentes localidades (Klein, 1976; Erbs et al., 1982; Gueymard, 1993; Ricieri, 1998; Oliveira et al. 2002).

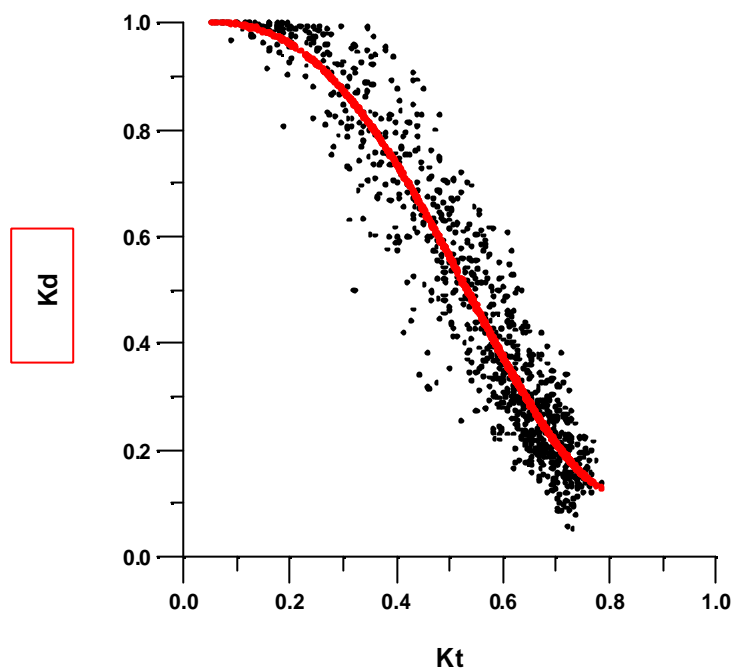


Figura 6.11. Distribuição diária de K_d em função de K_t , e o modelo ajustado por regressão polinomial de 4º grau (linha contínua).

A Figura (6.11) mostra os valores diários de K_d , em função de K_t , e a curva ajustada por regressão linear múltipla. Nota-se que quando K_d tende a um, K_t tende a zero, e quando K_d tende a zero, K_t tende a um. No intervalo intermediário, a correlação entre essas duas variáveis pode assumir tendência linear, exponencial, ou polinomial utilizando polinômios de diferentes graus. Dessa maneira, alguns autores correlacionam $K_d = f(K_t)$, em função de intervalos específicos de K_t .

Oliveira et al. (2002) trabalhando com dados coletados na cidade de São Paulo, concluem que o melhor ajuste é obtido com um polinômio de 4º, impondo limites máximos e mínimos para K_t .

Ricieri (1998) faz extensiva revisão dos modelos conceituais que correlacionam essas duas variáveis, e concluiu que quando é considerada a partição diária, das irradiações global, difusa e no topo da atmosfera, a regressão linear múltipla polinomial de 4º fornece o melhor ajuste para K_d em função de K_t para Botucatu-SP.

A equação de regressão linear múltipla obtida com valores diários para Botucatu-SP, no ajuste da curva polinomial de K_d em função de K_t , de 4º grau é dada pela Equação (6.4), com o coeficiente de determinação, $R^2=0,91$, EQM=0,074 e EM=0,0002.

$$K_d = 0,993 + 0,178K_t - 0,945K_t^2 - 4,71K_t^3 + 4,89K_t^4 \quad 6.4$$

A Figura (6.12) mostra os valores diários de K_{BH} , em função de K_t , e a curva ajustada por regressão linear. Nota-se que, para pequenos valores de K_t , K_{BH} tende a zero, e quando K_{BH} tende a um, K_t também tende a um. Portanto, acima de um determinado valor de K_t existe linearidade entre as duas variáveis, sugerindo que a correlação $K_{BH} = f(K_t)$, deve ser feita em função de intervalos específicos de K_t . Nesse caso, $K_{BH} = 0$ para valores de $K_t \leq 0,25$, condições de céu nublado. Para valores de $K_t > 0,25$ a correlação entre essas duas variáveis assume tendência linear.

A equação de regressão linear obtida com valores diários para Botucatu-SP, no ajuste da curva polinomial de K_{BH} em função de K_t , é dada pela Equação (6.5), com o coeficiente de determinação, $R^2 = 0,90$, $EQM = 0,084$ e $EM = -0,002$.

$$K_{BH} = -0,386 + 1,572 K_t, \text{ para } K_t > 0,25 \quad 6.5$$

$$K_{BH} = 0, \text{ para } K_t \leq 0,25$$

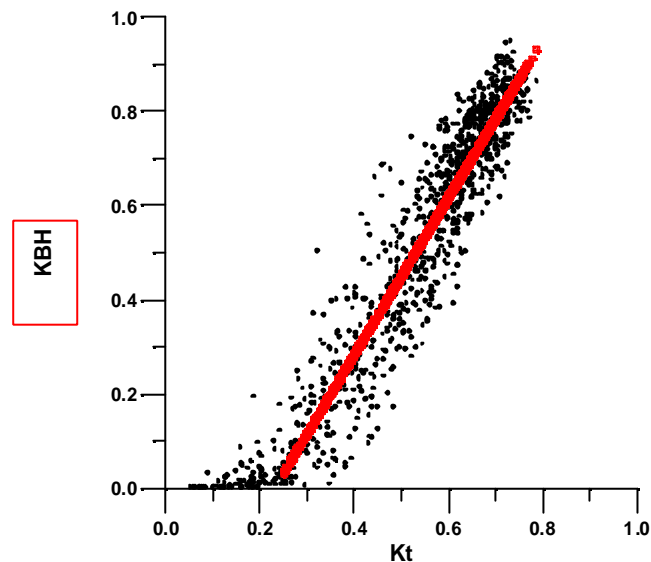


Figura 6.12. Distribuição diária de K_{BH} em função de K_t e o modelo ajustado por regressão linear polinomial de 1º grau (linha contínua).

Para se obter a estimativa da irradiação total diária na superfície inclinada, o procedimento adotado foi substituir nos modelos de estimativa modificados de Liu & Jordan, Hay, Reindl et al. e Perez et al., os valores observados da irradiação global na superfície horizontal R_G

em conjunto com os valores da irradiação difusa estimada através da Equação (6.4); os resultados obtidos estão mostrados na Figura (6.13). A Figura (6.14) mostra os resultados obtidos com os modelos modificados de estimativa da irradiação total utilizando os valores observados de R_G em conjunto com os valores da irradiação direta estimada através da Equação (6.5). Os modelos de estimativa de Temps & Coulson, Klucher e circunsolar foram desprezados por não apresentarem boa desempenho na estimativa de valores diários de irradiação na superfície inclinada.

A Figura (6.13) mostra os diagramas de dispersão da irradiação total diária na superfície inclinada estimada com os modelos: Liu & Jordan (Figura 6.13-A), Perez et al. (Figura 6.13-B), Hay (Figura 6.13-C) e Reindl et al. (Figura 6.13-D), modificados por $K_d = f(K_t)$. A Figura (6.14), mostra os diagramas de dispersão da irradiação total diária na superfície inclinada estimada com os modelos: Liu & Jordan (Figura 6.14-A), Perez et al. (Figura 6.14-B), Hay (Figura 6.14-C) e Reindl et al. (Figura 6.14-D), modificados por $K_{BH} = f(K_t)$. A análise visual dos diagramas de dispersão mostra que não existem diferenças marcantes entre as duas maneiras de modificar os modelos; somente o modelo de Perez et al. parece estar melhor ajustado para $K_{BH} = f(K_t)$ do que para $K_d = f(K_t)$, e na comparação com os modelos originais de estimativa da irradiação total Figura (6.8), verifica-se através dos diagramas de dispersão que os modelos modificados conservam as mesmas características dos modelos originais.

No Quadro 4, estão apresentados os valores diários de EQM e EM calculados para a irradiação total estimada na superfície inclinada obtida com os vários modelos de estimativa modificados por $K_{BH} = f(K_t)$, $K_d = f(K_t)$ e os respectivos valores calculados para os modelos originais (valores repetidos do Quadro 3).

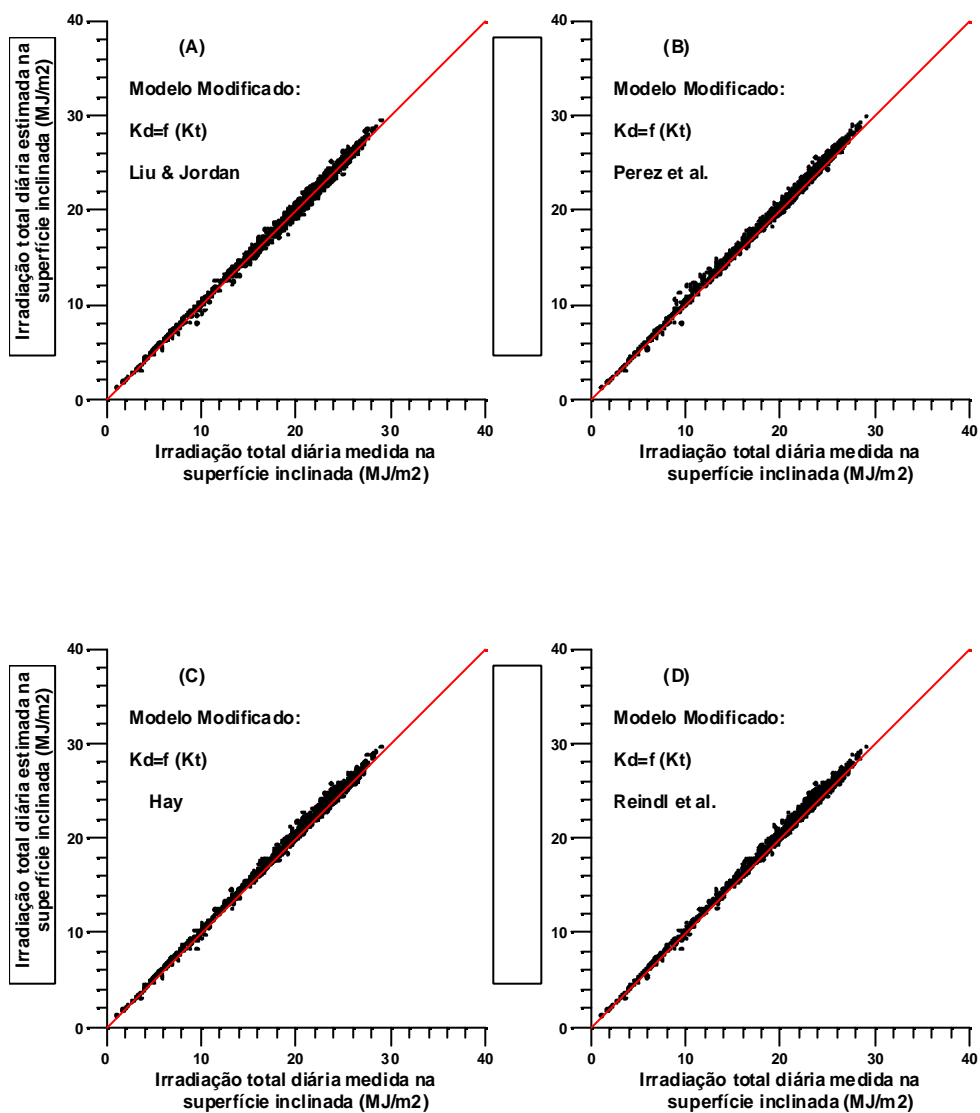


Figura 6.13. Distribuição da irradiação total diária no plano inclinado estimada através dos vários modelos modificados com $K_d = f(K_t)$, em função dos valores observados. A linha continua é a reta de 45°.

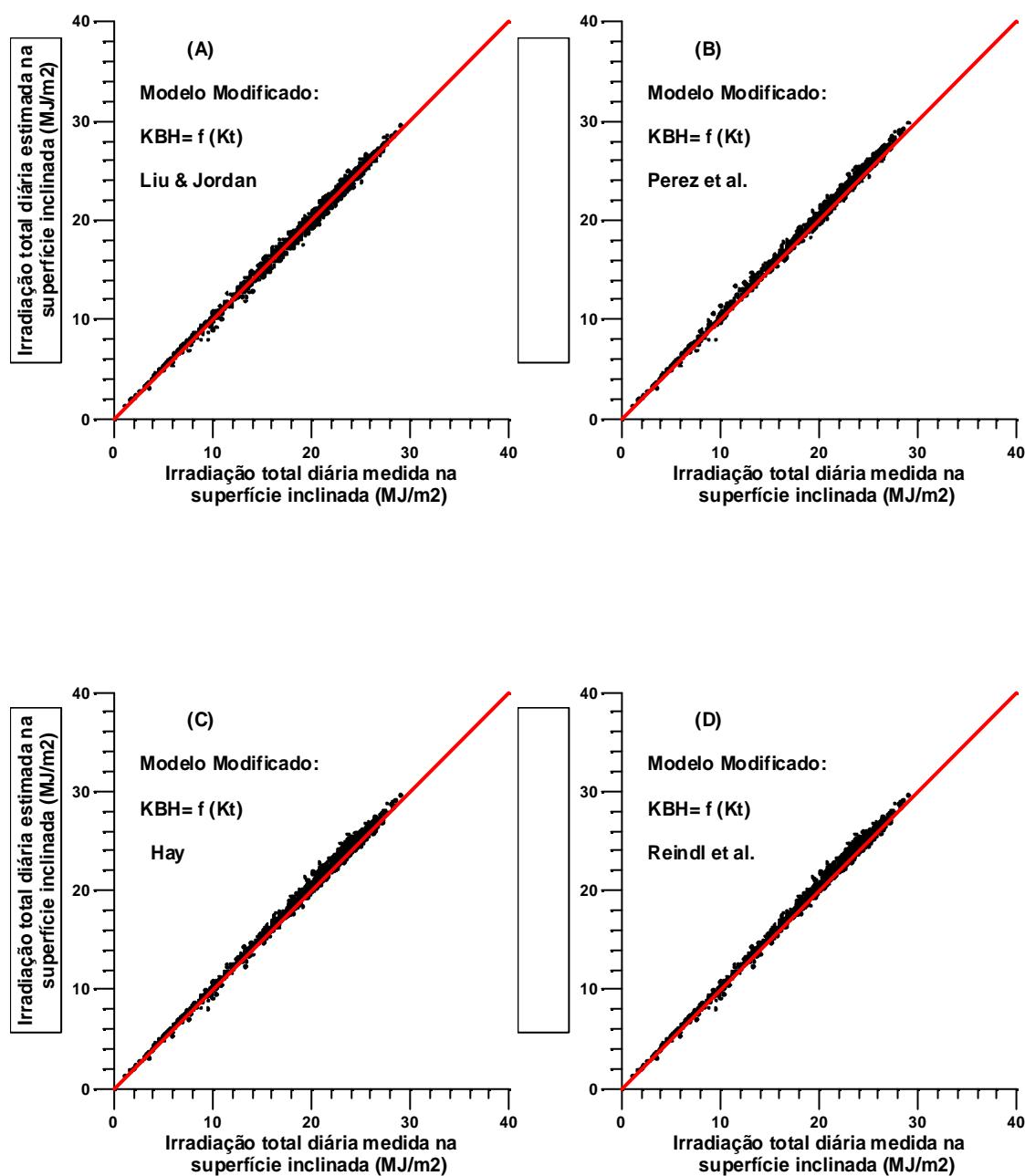


Figura 6.14. Distribuição da irradiação total diária no plano inclinado estimada através dos vários modelos modificados com $K_{BH} = f(K_t)$, em função dos valores observados. A linha contínua é a reta de 45°.

Quadro 4. Valores de EQM e EM, em porcentagem para a irradiação total diária estimada com os vários modelos modificados, $K_d = f(K_t)$ e $K_{BH} = f(K_t)$, e os erros obtidos com os modelos originais.

Modelos de estimativa da irradiação total	Modelos Originais		Modelos Modificados $K_d = f(K_t)$		Modelos Modificados $K_{BH} = f(K_t)$	
	EQM (%)	EM (%)	EQM (%)	EM (%)	EQM (%)	EM (%)
Liu & Jordan (1963)	2,56	-1,29	2,41	-0,26	2,36	-0,25
Hay (1979)	2,43	0,91	2,53	1,05	2,52	1,03
Reindl et al. (1990)	2,46	1,03	2,57	1,17	2,56	1,15
Perez et al. (1987)	2,48	1,28	2,55	1,34	2,45	1,33

Comparando os resultados dos modelos modificados com os originais verifica-se que para o modelo de Liu & Jordan e para as duas diferentes modificações feitas, que existe melhoria significativa para esse modelo com EM, em modulo, e EQM menores do que os obtidos com o modelo original, embora continue subestimando os valores. Como esse modelo, na forma original, não considera condições que caracterizam o estado do céu, com o uso da irradiação difusa ou da direta estimada em função do índice de claridade, que é uma caracterização do estado do céu, pode ser a causa da melhoria no modelo de Liu & Jordan. De maneira geral, a análise dos erros demonstra que eles aumentam para todos os outros modelos, com pouco aumento da superestimativa e dos valores da dispersão, com similaridade para ambos os métodos de modificação quando comparados com os erros obtidos com os modelos originais, sendo que esses erros são

menores para a modificação feita com a função $K_{BH} = f(K_t)$, provavelmente devido à correlação linear entre as duas variáveis.

6.5 Modelo estatístico para estimar a irradiação total diária

Os modelos de estimativa da irradiação total na superfície inclinada exigem o conhecimento da irradiação direta medida na horizontal, sendo este um procedimento de alto custo instrumental e operacional. Um método simples e eficiente que não utiliza medidas da irradiação direta na horizontal, é desenvolvido, utilizando a técnica de regressão linear onde a irradiação total observada na superfície inclinada é relacionada com a irradiação global medida na superfície horizontal.

A Figura (6.15) mostra os valores da irradiação total diária na superfície inclinada, em função da irradiação global diária na superfície horizontal. Em condições de céu nublado, baixos valores de irradiação, é mínima a dispersão dos valores ao redor da reta de 45°, isto é, as duas superfícies recebem praticamente a mesma quantidade de energia, sendo que a superfície inclinada recebe menos energia do que a superfície horizontal devido a sua inclinação em relação à superfície horizontal. A grande dispersão dos valores que ocorre, em condições de céu parcialmente nublado e claro, é devido à época do ano em que as observações foram feitas, durante o outono e inverno, a quantidade de energia recebida pela superfície inclinada é maior do que a recebida pela superfície horizontal, o inverso ocorre durante os meses da primavera e verão, sendo essa a principal causa da dispersão observada.

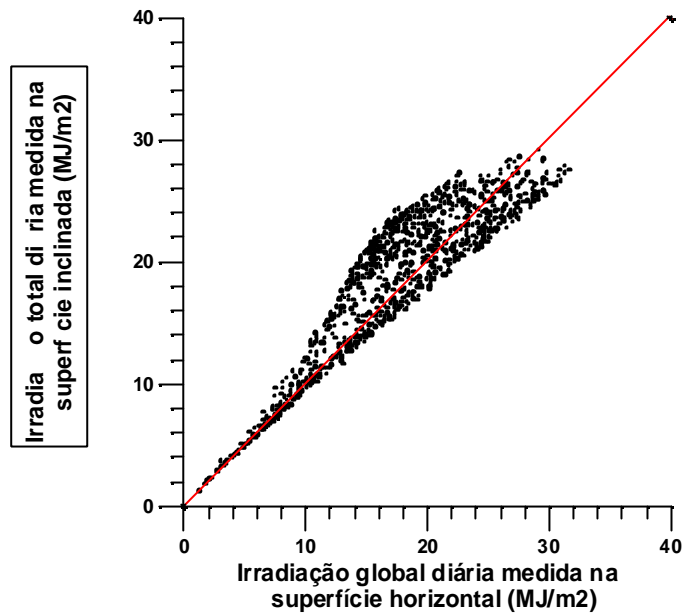


Figura 6.15. Distribuição diária da irradiação total medida na superfície inclinada, em função da irradiação global medida na superfície horizontal. A linha contínua é a reta de 45°.

Para evitar a grande dispersão encontrada entre as irradiações total e a global ao longo do ano, procurou-se através de uma mudança de coordenadas, uma relação que, ao menos na ausência de nuvens, tende à linearidade, isso é obtido através da comparação entre a razão

da irradiação total pela irradiação global medidas na superfície ($RBS = \frac{H_{bTO}^d}{H_g^d}$), com a razão das

mesmas variáveis calculadas no topo da atmosfera ($R_B = \frac{H_{b0}^d}{H_0^d}$). O resultado está mostrado na

Figura (6.16), distribuição diária de RBS em função de R_B . Verifica-se que existe linearidade entre essas duas variáveis, no entanto com considerável dispersão para os maiores valores de R_B , ou seja,

durante os meses de inverno e outono. Isso é devido à formação de nebulosidade na atmosfera, condições em que a correção da irradiação na superfície inclinada é pequena, e consequentemente RBS também é pequeno e bem menor do que R_B . Durante a primavera e verão, a existência de muitos dias nublados exige pouca correção dos valores, além dessas correções serem pequenas o que acarreta pouca dispersão nos valores obtendo uma melhor linearidade entre as variáveis.

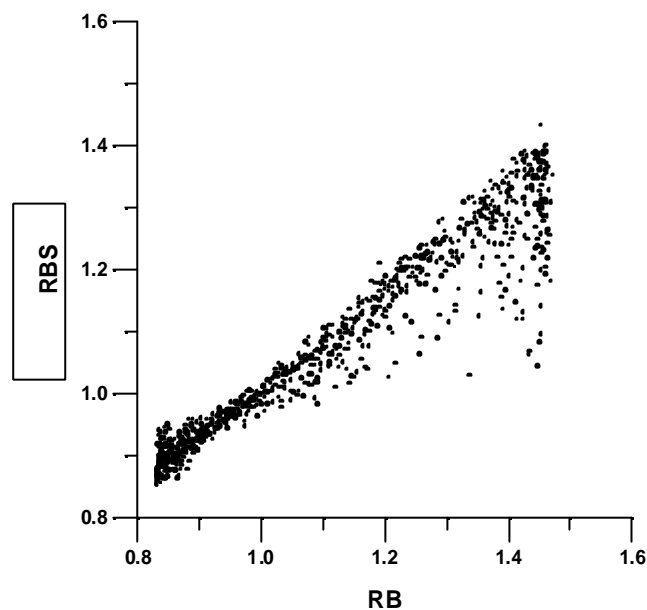


Figura 6.16. Distribuição diária de RBS , em função de R_B

Assim, a equação de regressão linear múltipla apropriada deve ser escrita em função, de (R_B), do albedo da superfície (r) e das condições atmosféricas (K_t), isto é, $RBS = f(R_B, r, K_t)$, como o albedo da superfície varia muito pouco durante o ano na região de Botucatu-SP, essa variável foi desprezada, e a equação de regressão linear múltipla ajustada com as outras duas variáveis, com $R^2 = 0,87$, é dada por:

$$RBS = 0,286 + 0,620 R_B + 0,176 K_t \quad 6.6$$

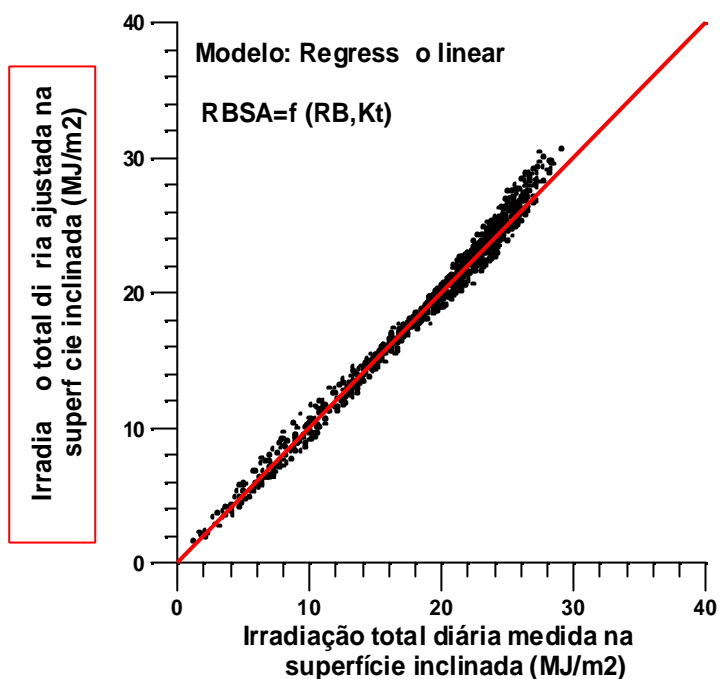


Figura 6.17. Distribuição diária da irradiação total ajustada através de regressão linear múltipla $RBSA$, em função da irradiação total observada. A linha contínua é reta de 45° .

O valor ajustado da irradiação total diária anual na superfície inclinada é obtido através da multiplicação da Equação (6.6) pela irradiação global diária R_G , o erro médio desse ajuste é $EM=0,28\%$ indicando que os valores no geral são superestimados, no entanto, menores do que os obtidos com os modelos de estimativa da irradiação total na superfície inclinada, e com os mesmos modelos modificados Quadro 4, e o $EQM=3,91\%$ é maior do que os obtidos com os modelos de estimativa. Na Figura (6.17), esta mostrado o diagrama de dispersão obtido com o ajuste através de regressão linear múltipla; nota-se que existe grande dispersão dos dados para os

menores valores de irradiação, e o modelo superestima os mais altos valores de irradiação, contudo para valores intermediários de irradiação os valores estão bem ajustados demonstrando que o modelo de regressão linear pode ser utilizado com razoável precisão para estimar a irradiação total na superfície inclinada.

6.6 Validação dos modelos estatístico e modificados de estimativa da irradiação total

6.6.1 Validação anual

Para validar o modelo estatístico e os modelos modificados por K_d e por K_{BH} , de estimativa da irradiação total na superfície inclinada, foram utilizados os dados coletados durante o período de setembro do ano 2000 a agosto de 2001, sendo que foram utilizados somente 334 dias.

Com a finalidade de comparar os resultados obtidos com o modelo estatístico e com os modelos modificados de estimativa, os valores de EM e EQM foram calculados para os modelos originais de estimativa de Liu & Jordan, Hay, Perez et al. e Reindl et al., utilizando o conjunto de dados da validação. No Quadro 5 estão mostrados os valores de EM e EQM para os vários modelos de estimativa da irradiação total diária na superfície inclinada e para o modelo de regressão linear, utilizando o conjunto de dados da validação. Comparando os valores de EM entre os vários modelos, verifica-se que os modelos de Liu & Jordan e regressão linear subestimam os valores, enquanto que os outros modelos superestimam, embora o EM, em módulo, obtido com o modelo de regressão linear é o menor de todos e o EQM tem o maior valor, e o modelo de Hay é superior aos outros modelos por apresentar os menores valores de EM e EQM. E novamente o

modelo de Reindl et al. tem desempenho quase que idêntica ao modelo de Hay, não contribuindo para melhorias desse modelo.

Esses resultados são similares aos obtidos com o conjunto de dados utilizados na validação dos modelos, no período compreendido entre setembro de 1997 e agosto de 2000, existindo pouca diferença entre os EM e EQM, Quadro (3), devido a utilização de um novo conjunto de dados.

Quadro 5. Valores de EQM e EM, em porcentagem para o modelo estatístico, e os modelos de estimativa da irradiação total, utilizando o conjunto de dados da validação.

Modelos de estimativa	EQM %	EM %
Hay	2,47	0,95
Reindl et al.	2,51	1,06
Perez et al.	2,77	1,49
Liu & Jordan	3,18	-1,94
Regressão linear	3,95	-0,54

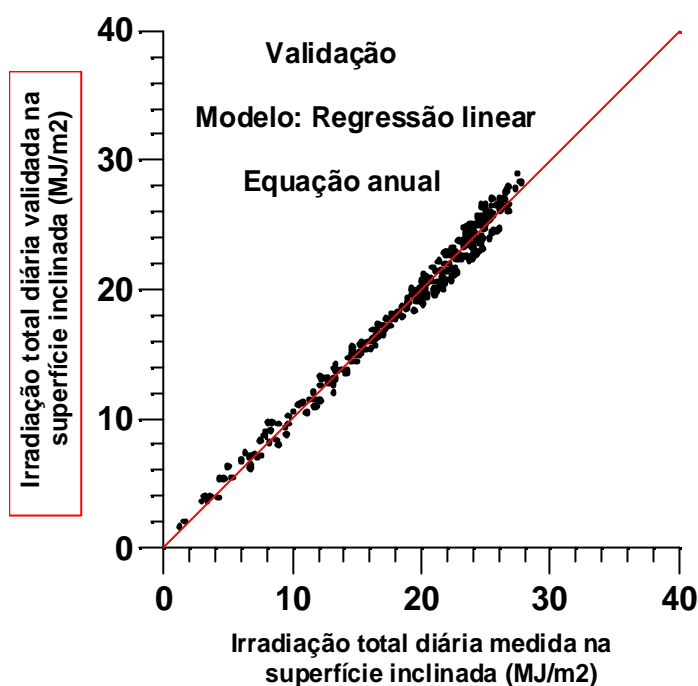


Figura 6.18. Distribuição diária da irradiação total validada com o modelo de regressão linear múltipla, em função da irradiação total observada. A linha contínua é reta de 45°.

Na Figura (6.18) está mostrado o diagrama de dispersão obtido com o modelo de regressão linear; nota-se que, utilizando o conjunto de dados da validação, os altos valores da irradiação apresentam grande dispersão e são, na média, superestimados, enquanto que os valores intermediários estão bem ajustados e os menores valores de irradiação no geral são superestimados.

Os valores de EM e EQM, calculados na validação dos modelos modificados por K_d , K_{BH} , e os erros obtidos com os modelos originais, copiados do Quadro 5, estão mostrados no Quadro 6. Na análise dos erros, para os modelos modificados por K_d verifica-

se que o modelo de Liu & Jordan subestima os valores da irradiação, enquanto que os outros modelos superestimam. Nota-se que, excetuando-se o modelo de Liu & Jordan onde obtêm-se melhorias significativas para o EM, em modulo, e também para o valor de EQM, os outros modelos têm os EM aumentado em média ao redor de 65%, e os EQM em torno de 15%.

Quadro 6. Valores de EQM e EM, em porcentagem para a validação da irradiação total diária estimada com os vários modelos modificados, $K_d = f(K_t)$ e $K_{BH} = f(K_t)$, e os erros obtidos com os modelos originais.

Modelos de estimativa da irradiação total	Modelos Originais		Validação $K_d = f(K_t)$		Validação $K_{BH} = f(K_t)$	
	EQM %	EM %	EQM %	EM %	EQM %	EM %
Hay	2,47	0,95	3,18	1,56	2,53	1,21
Reindl et al.	2,51	1,06	3,22	1,73	2,59	1,33
Perez et al.	2,77	1,49	3,21	2,28	2,86	1,88
Liu & Jordan	3,83	-1,94	3,23	-0,61	2,77	0,56

No quadro 7, estão mostrados os maiores erros, para todos os modelos modificados por $K_d = f(K_t)$, obtidos para um dia em particular. A maior subestimativa do valor é de (-15,8%) encontrada para o modelo de Liu & Jordan sendo que ocorre durante o inverno, e a menor superestimativa do valor é de (4,8%) também encontrada para o modelo de Liu & Jordan e ocorre no verão, os outros modelos apresentam erros compatíveis entre si, com superestimativa em

torno de (7,0%) e subestimativa ao redor de (-7,0%) que ocorrem no inverno e outono, sendo que esses erros ocorrem nos mesmos dias para os modelos de Hay e Reindl et al., já que esses modelos são equivalentes.

Quadro 7. Maiores erros em porcentagem na validação dos modelos de estimativa da irradiação total diária, para um dia em particular, considerando os modelos modificados por,

$$K_d = f(K_t)$$

Modelos	Dia	ERRO %
Liu & Jordan	03-07-2001	-15,8
	01-03-2001	4,8
Perez et al.	22-04-2001	-7,4
	20-05-2001	7,1
Hay	16-05-2001	-6,5
	03-06-2001	7,2
Reindl et al.	16-05-2001	-6,7
	03-06-2001	7,7

A Figura (6.19), mostra os diagramas de dispersão da irradiação total diária na superfície inclinada validada com os modelos de Liu & Jordan (Figura 6.19-A), Perez et al. (Figura 6.19-B), Hay (Figura 6.19-C) e Reindl et al. (Figura 6.19-D), modificados por

$K_d = f(K_t)$. Quando esses diagramas são comparados com os obtidos com os modelos modificados Figura (6.9), verifica-se que existe um aumento considerável da dispersão dos valores validados para todos os modelos, principalmente para os valores intermediários e altos de irradiação, e como demonstrado com os valores calculados de EQM Quadro 6.

A Figura (6.20) mostra os diagramas de dispersão da irradiação total diária na superfície inclinada validada com os modelos de Liu & Jordan (Figura 6.20-A), Perez et al. (Figura 6.20-B), Hay (Figura 6.20-C) e Reindl et al. (Figura 6.20-D), modificados por $K_{BH} = f(K_t)$. Nesse caso, a análise visual dos diagramas demonstra que os valores de irradiação validados são bem ajustados para todos os níveis de irradiação, e para todos os modelos, quando comparados com os modelos modificados, Figura (6.9).

Na análise dos erros Quadro 6, verifica-se que todos os modelos superestimam os valores da irradiação validada. Sendo que é obtido melhorias significativas para o modelo modificado de Liu & Jordan, sendo este, compatível com os outros modelos. Nota-se que os valores de EM para os modelos modificados aumentam em torno de 30%, enquanto que os valores de EQM têm aumento médio em torno de 3%.

No quadro 8, estão mostrados os maiores erros em porcentagem para todos os modelos modificados por $K_{BH} = f(K_t)$, obtidos para um dia em particular. Novamente a maior subestimativa do valor é de (-13,1%) encontrada para o modelo de Liu & Jordan sendo que ocorre durante o inverno, e a menor superestimativa do valor é de (5,6%) também encontrada para o modelo de Liu & Jordan e ocorre no verão. Nesse caso também os outros modelos apresentam erros compatíveis entre si, com superestimativa em torno de (6,0%) e subestimativa ao redor de (-7,0%) que ocorrem também durante o inverno e outono, sendo que esses erros máximos tem pouca

diferença quando comparados com os erros encontrados com os modelos modificados em função de

$$K_d = f(K_t).$$

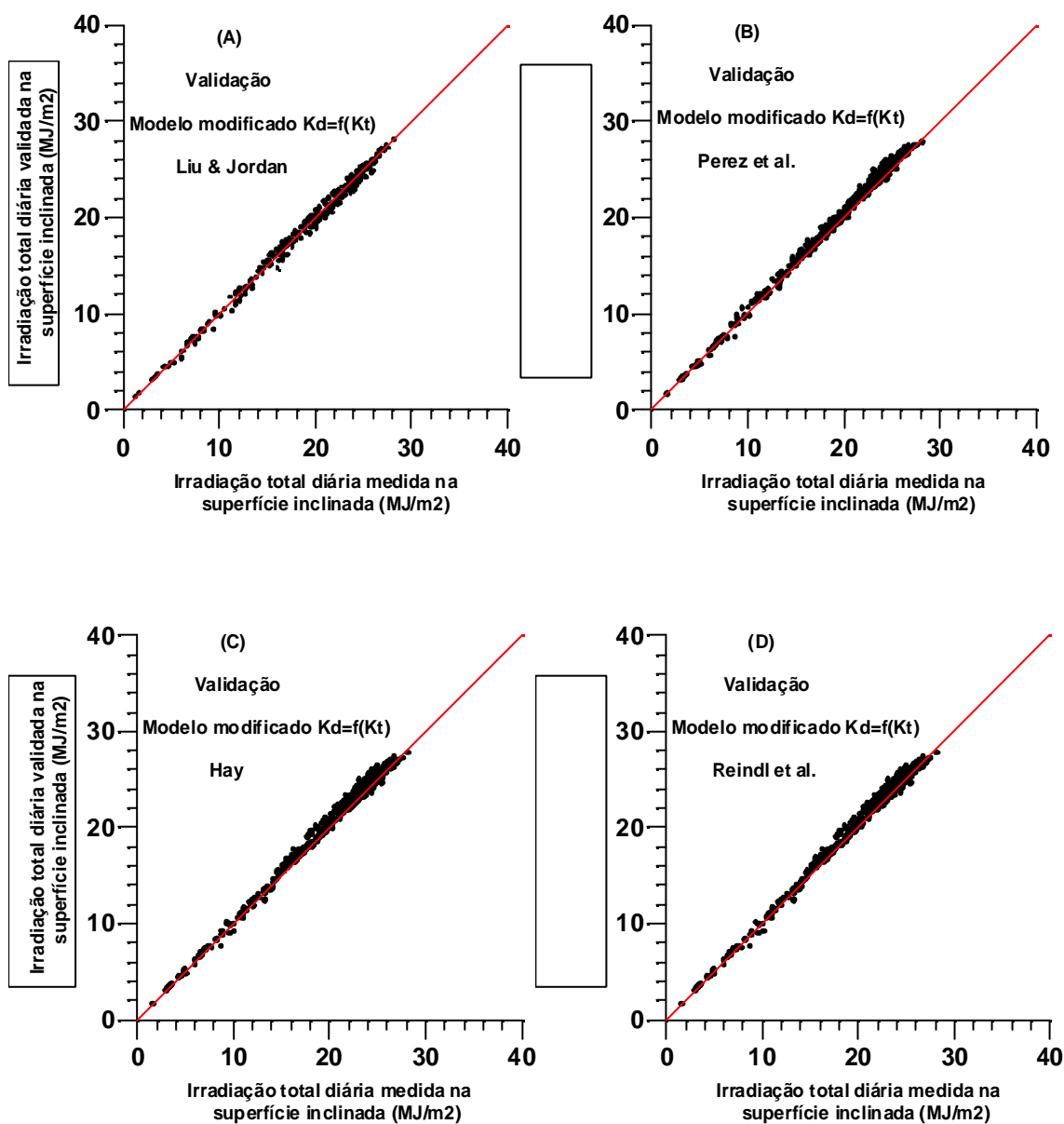


Figura 6.19. Distribuição da irradiação total diária no plano inclinado validada através dos vários modelos modificados com K_d em função dos valores observados. A linha contínua é a reta de 45°.

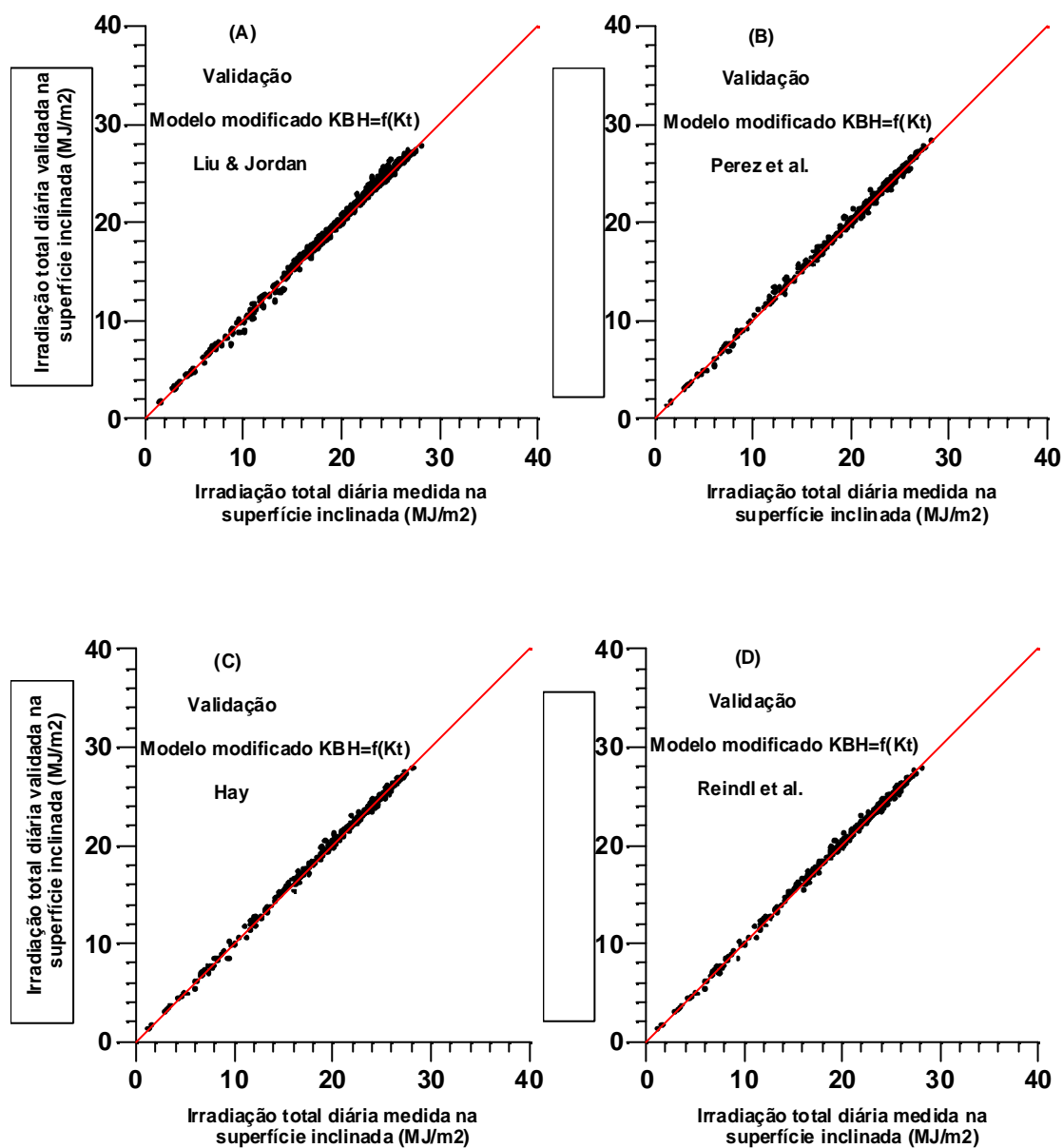


Figura 6.20. Distribuição da irradiação total diária no plano inclinado validada através dos vários modelos modificados com $K_{BH} = f(K_t)$ em função dos valores observados. A linha continua é a reta de 45°.

Quadro 8. Maiores erros em porcentagem na validação dos modelos de estimativa da irradiação total diária, que ocorrem para um dia em particular, considerando os modelos modificados por, $K_{BH} = f(K_t)$

Modelos	Dia	ERRO %
Liu & Jordan	30-06-2001	-13,1
	02-02-2001	5,6
Perez et al.	08-07-2001	-6,5
	19-06-2001	6,1
Hay	27-04-2001	-7,0
	15-04-2001	5,6
Reindl et al.	27-04-2001	-6,7
	15-04-2001	5,7

A análise dos erros com os modelos modificados por $K_d = f(K_t)$ e com $K_{BH} = f(K_t)$, Quadro 4, demonstra que as duas modificações são compatíveis entre si e para todos os modelos, e podem estimar a irradiação total na superfície inclinada com razoável precisão quando comparadas com os modelos originais de estimativa. Na validação, a comparação dos erros entre as duas modificações feitas, Quadro 6, mostra que os erros têm um aumento considerável para todos os modelos quando a modificação é feita através de $K_d = f(K_t)$. Para os modelos modificados através de $K_{BH} = f(K_t)$, os erros aumentam pouco em comparação com os obtidos com os modelos originais, isso provavelmente é devido à linearidade da equação encontrada para

essa correlação. A análise demonstra, ainda, que o modelo de regressão linear anual, Quadro 5, tem EM, em módulo, menor do que todos os modelos de estimativa modificados, e EQM é maior do que qualquer um dos modelos modificados principalmente para a modificação feita com $K_{BH} = f(K_t)$.

6.6.2 Validação mensal

Para verificar o comportamento dos modelos no decorrer do ano, eles foram validados para um intervalo mais curto de tempo, ou seja mensalmente. Como o modelo de Reindl et al. tem comportamento equivalente ao modelo de Hay, não foi utilizado na validação mensal, ficando restrita a comparação entre os modelos de Hay, Liu & Jordan, Perez et al. e o modelo estatístico.

Os valores de EM obtidos mensalmente com os modelos de estimativa da irradiação total diária estão mostrados na Figura (6.21). Nota-se claramente que o modelo de Liu e Jordan subestima os valores de irradiação em praticamente todos os meses do ano, exceto para os meses de janeiro e dezembro. A subestimativa é grande para os meses de outono e inverno, isso é devido ao fato que no modelo de Liu & Jordan a irradiação difusa é corrigida apenas pelo fator geométrico, uma correção válida somente para irradiação difusa isotrópica. No entanto, durante o inverno, na região de Botucatu, onde prevalecem condições de céu claro e a irradiação difusa tem caráter anisotrópico, a correção geométrica é insuficiente, sendo necessário incluir os efeitos da anisotropia na correção da irradiação difusa. O modelo de regressão linear tem um comportamento similar ao modelo de Liu e Jordan, subestimando os valores durante o outono e inverno, com exceção do mês de setembro, e superestimando durante a primavera e verão, sendo os EM, em

módulo, maior do que todos os modelos durante o verão e primavera, e menor apenas quando comparados com os EM obtidos com o modelo de Liu & Jordan durante o inverno e outono. Os modelos de Hay e Perez et al. superestimam os valores em todos os meses do ano, com os menores valores de EM para o modelo de Hay.

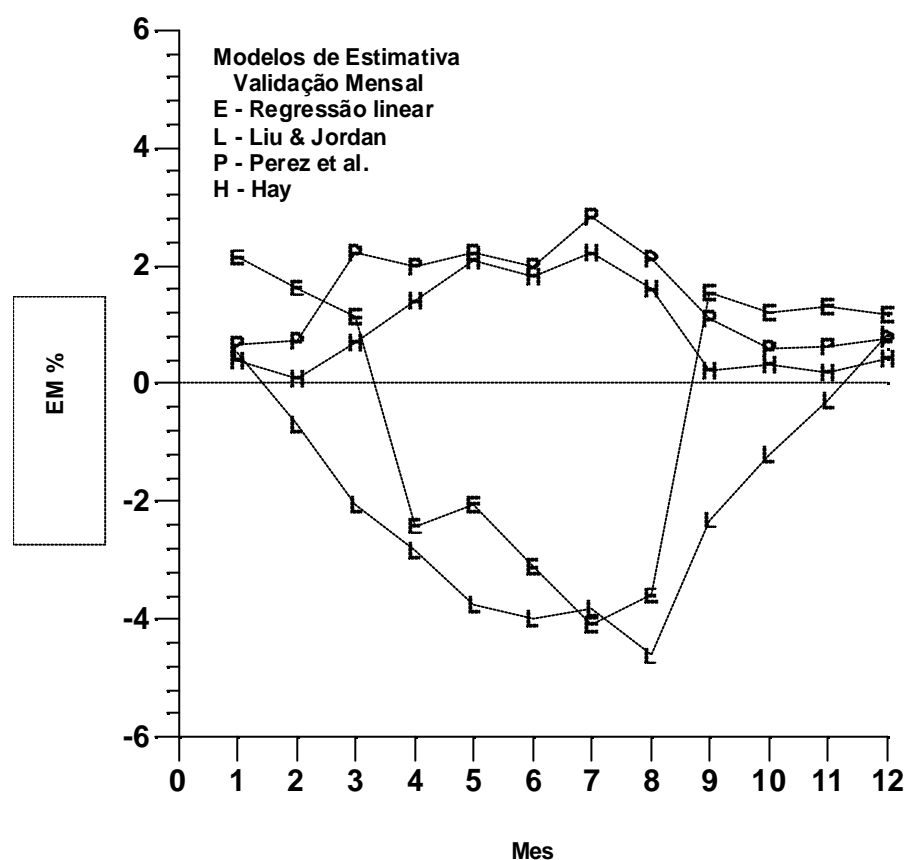


Figura 6.21. EM mensal para a irradiação total diária estimada com os modelos de Liu & Jordan, Hay, Perez et al. e estatístico.

Os valores de EQM, obtidos mensalmente com os modelos de estimativa da irradiação total diária, estão mostrados na Figura (6.22). Nota-se claramente que para todos os

modelos os EQM são maiores durante o outono e inverno do que durante a primavera e verão. O modelo de regressão linear é o que apresenta os maiores valores de EQM em praticamente todos os meses do ano e o modelo de Hay tem os menores valores de EQM em todos os meses, sendo este o melhor modelo para estimar a irradiação total diária na superfície inclinada, por apresentar os menores erros médios e menores valores de dispersão.

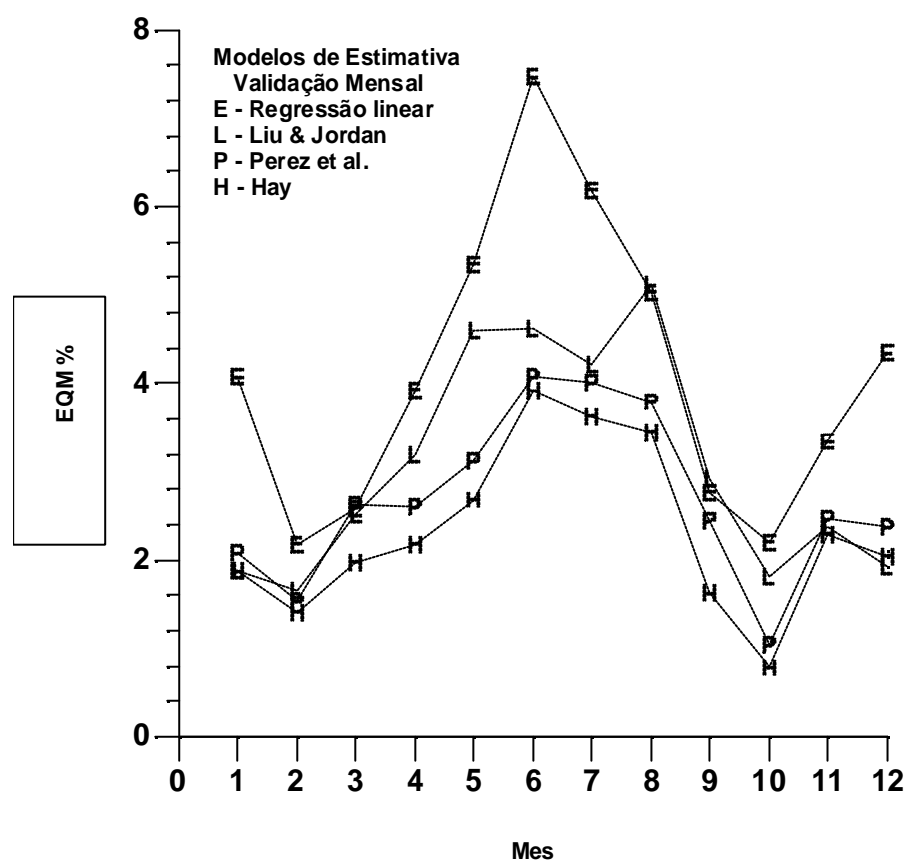


Figura 6.22. EQM mensal para a irradiação total diária estimada com os modelos de Liu & Jordan, Hay, Perez et al. e regressão linear.

Na Figura (6.23) estão mostrados os EM resultante da validação mensal da irradiação total diária na superfície inclinada utilizando os modelos de estimativa de Liu & Jordan, Perez et al. e Hay, modificados por $K_d = f(K_t)$.

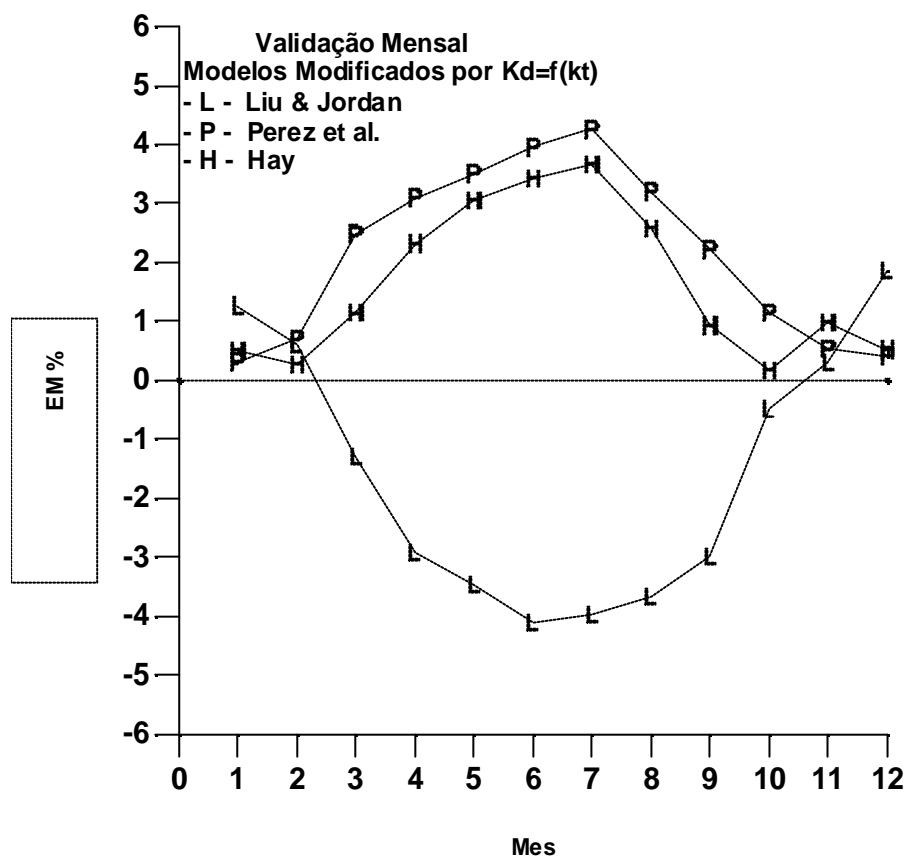


Figura 6.23. EM mensal para a irradiação total diária validada com os modelos de Liu & Jordan, Hay, Perez et al., modificados por K_d .

Na análise dos erros verifica-se que, novamente, o modelo de Liu & Jordan subestima os valores da irradiação principalmente durante o outono e inverno, enquanto que os outros modelos superestimam os valores em todos os meses do ano. Quando os erros são comparados, com os obtidos com os modelos de estimativa originais Figura (6.21), verifica-se que os

valores de EM permanecem quase inalterados para o modelo de Liu & Jordan durante os meses do inverno e outono e aumentam no começo do verão e final da primavera. O modelo de Hay, durante a primavera e verão, têm um aumento médio dos EM, em torno de 25%, atingindo um aumento máximo em torno de 65% durante o inverno no mês de julho, e o modelo de Perez et al. apresenta em média, erros maiores em torno de 15% durante a primavera e verão, e também aumenta em muito os erros durante o outono e inverno, com um pico máximo em torno de 70% durante o mês de julho.

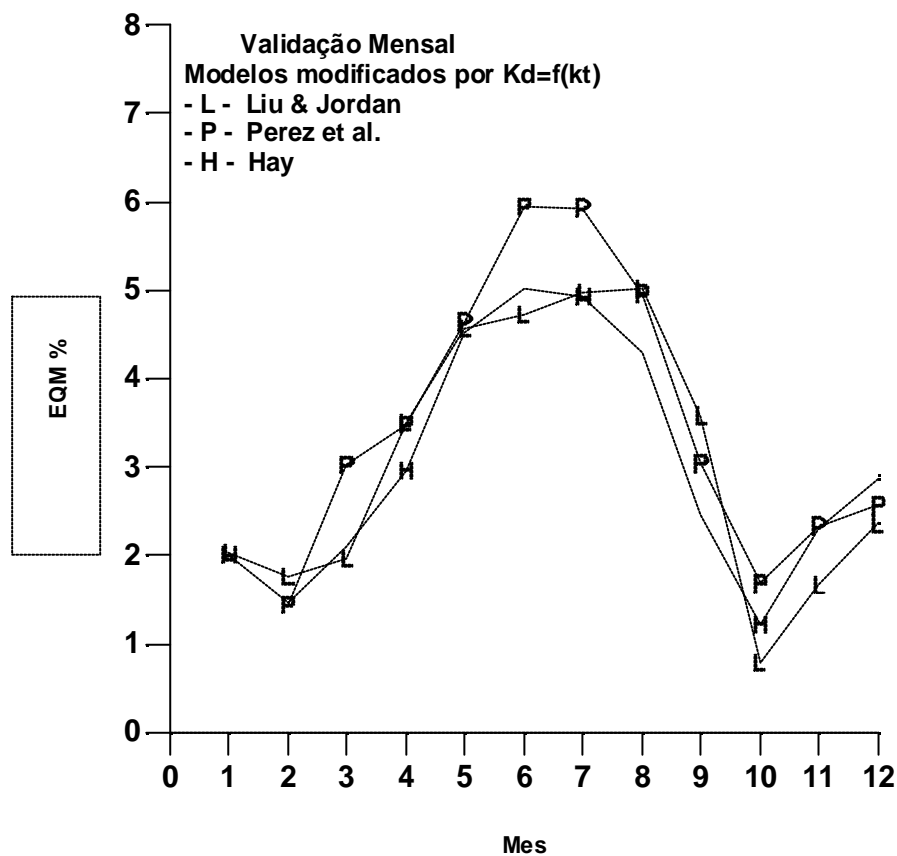


Figura 6.24. EQM mensal para a irradiação total diária validada com os modelos de Liu & Jordan, Hay, Perez et al., modificados por K_d .

Na Figura (6.24) estão mostrados os EQM resultante da validação mensal da irradiação total diária na superfície inclinada utilizando os modelos de estimativa de Liu & Jordan, Perez et al. e Hay, modificados por $K_d = f(K_t)$. Na análise, verificou-se que os EQM seguem o mesmo comportamento dos EM, permanecem quase que inalterados para o modelo de Liu & Jordan, aumentam em todos os meses para o modelo de Hay principalmente durante o outono e inverno atingindo um pico máximo no mês de julho em torno de 36%, e têm um aumento médio em torno de 6% durante a primavera e verão, o modelo de Perez et al. também apresenta aumento nos valores da dispersão em torno de 35% durante o outono e inverno e de 10% durante a primavera e verão.

Quando os modelos são modificados através de K_d , excetuando-se o modelo de Liu & Jordan onde os erros permanecem praticamente inalterados, tanto os EM quanto os EQM aumentam para todos os outros modelos, sendo extremamente elevados durante os meses de inverno e outono.

Na Figura (6.25) estão mostrados os EM resultante da validação mensal da irradiação total diária na superfície inclinada utilizando os modelos de estimativa de Liu & Jordan, Perez et al., Hay, modificados por $K_{BH} = f(K_t)$. Na análise dos erros verifica-se que o modelo de Liu & Jordan continua subestimando os valores da irradiação total, principalmente durante o outono e inverno, e superestima em alguns meses da primavera e verão, no entanto são encontradas melhorias significativas, tornando esse modelo compatível com os outros modelos modificados de estimativa da irradiação total diária na superfície inclinada. Os outros modelos superestimam a irradiação total em todos os meses do ano, o modelo de Perez et al., têm os erros aumentado em torno de 50% durante a primavera e verão e em torno de 15% durante o outono e inverno. No modelo de Hay, os EM têm

um aumento médio em torno de 70% durante a verão, e aumentam em torno de 8% durante o outono e inverno, e durante a primavera os resultados obtidos com o modelo modificado são melhores ajustados do que os obtidos com os modelos originais, pois diminuem em torno de 30%.

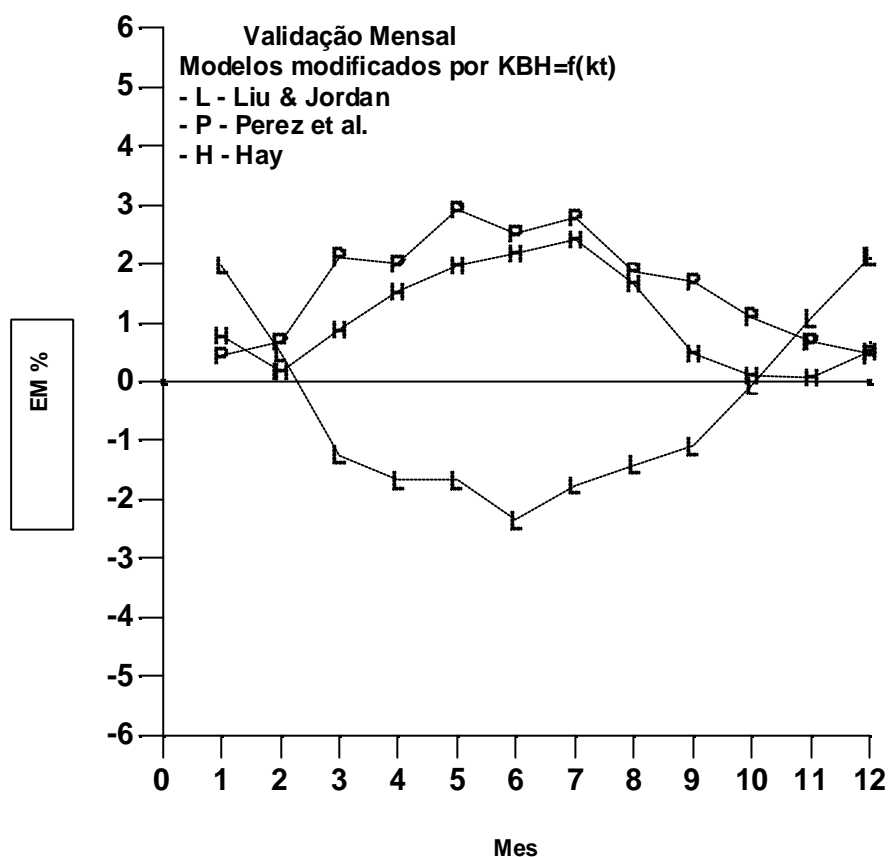


Figura 6.25. EM mensal para a irradiação total diária validada com os modelos de Liu & Jordan, Hay, Perez et al., modificados por $KBH = f(K_t)$.

Na Figura (6.26) estão mostrados os EQM resultantes da validação mensal da irradiação total diária na superfície inclinada utilizando os modelos de estimativa de Liu & Jordan, Perez et al., Hay, modificados por $KBH = f(K_t)$. Na análise dos EQM verifica-se que o modelo de Liu & Jordan, apresenta dispersão em torno de 16% menores com o modelo modificado do que

com as obtidas com o modelo original em praticamente todos os meses do ano, exceto nos meses de janeiro e dezembro onde a dispersão aumenta em torno de 30%. O modelo de Perez et al. tem aumento médio em torno de 15% durante o outono e inverno, e ficam praticamente inalterados durante a primavera, com cerca de 8% maiores durante o verão, os EQM encontrados para o modelo modificado de Hay, demonstram que os valores da dispersão permanecem praticamente inalterados durante o verão, com aumento médio em torno de 7% durante o outono e inverno, e diminuem em torno de 25% durante a primavera.

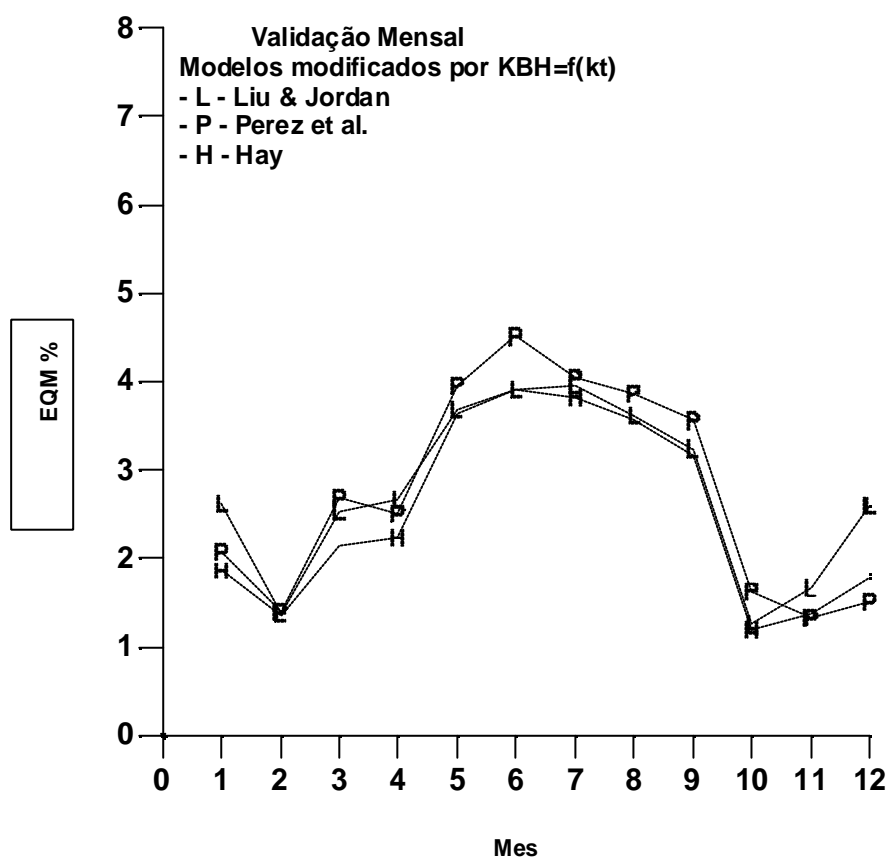


Figura 6.26. EQM mensal para a irradiação total diária validada com os modelos de Liu & Jordan, Hay, Perez et al., modificados por KBH .

A análise dos erros com os modelos modificados por $K_d = f(K_t)$ e com $K_{BH} = f(K_t)$, Quadro 4, demonstra que as duas modificações são compatíveis entre si e para todos os modelos, e podem estimar a irradiação total na superfície inclinada com razoável precisão quando comparadas com os modelos originais de estimativa. Na validação, a comparação entre os erros com as duas modificações feitas, mostra que os erros têm um aumento considerável para todos os modelos, exceto para o de Liu & Jordan, quando a modificação é feita através de $K_d = f(K_t)$, demonstrando que quando a irradiação difusa é estimada através de regressão linear múltipla com um polinômio de 4º grau, e usada nos modelos modificados, não produz resultados satisfatórios quando se utiliza um conjunto de dados diferente daqueles nos quais ela foi obtida.

Para os modelos modificados através de $K_{BH} = f(K_t)$, os erros aumentam pouco em comparação com os obtidos com os modelos originais, obtendo-se melhorias significativas para o modelo de Liu & Jordan, esse resultado demonstra que quando a irradiação direta na horizontal é estimada através de regressão linear com um polinômio de 1º grau, e usada nos modelos modificados, produz resultados satisfatórios quando se utiliza um conjunto de dados diferente daqueles em que ela foi obtida.

De maneira geral, na estimativa da irradiação diária mensal, os resultados obtidos com os modelos de estimativa modificados por $K_{BH} = f(K_t)$, são melhores ajustados do que os obtidos com a modificação $K_d = f(K_t)$, e podem ser utilizados para estimar a irradiação total na superfície inclinada com razoável precisão, principalmente com o modelo de Hay, devido ao fato de se encontrar os menores EM e EQM. O modelo obtido através de regressão linear anual tem desempenho pior do que os modelos de estimativa da irradiação diária total e dos mesmos modelos

modificados através de $K_{BH} = f(K_t)$, sendo comparável aos modelos modificados por $Kd = f(K_t)$, isso é em parte devido à alta variabilidade anual de R_B (Figura 6.10), como a análise dos EM para o modelo de regressão linear (Figura 6.21), demonstra basicamente que o modelo superestima os valores durante a primavera e verão, e subestima durante o inverno e outono; para se ter melhor precisão com esse modelo, o ajuste através de regressão linear deve ser feito semestralmente obtendo duas equações de estimativa, uma delas para o outono e inverno, dada pela Equação (6.7) com $R^2=0,88$ e a outra para a primavera e verão, dada pela Equação (6.8) com $R^2=0,83$.

$$OIA = 0,130 + 0,624 R_B + 0,436 K_t \quad 6.7$$

$$PVA = 0,395 + 0,620 R_B - 0,041 K_t \quad 6.8$$

Quadro 9. EM e EQM, em porcentagem para o modelo de regressão linear semestral.

Modelo estatístico semestral	EQM %	EM %
Primavera e Verão	2,00	0,032
Outono e Inverno	2,78	0,090

No Quadro 9, estão mostrados os EM e EQM, obtidos para o modelo de regressão linear semestral; nota-se que, para as duas equações, os valores são pequenos e

superestima os valores; no entanto, os erros médios são menores dos que os obtidos com os modelos de estimativa, e com os mesmos modelos modificados para as duas modificações feitas, Quadro 4, os EQM também são menores para a equação que ajusta os valores durante a primavera e verão, e ligeiramente superiores para o ajuste feito durante o inverno e outono.

Validando mensalmente o modelo estatístico semestral, e comparando os EM e EQM, com os obtidos com o modelo de Hay e o mesmo modelo modificado por Hay $K_{BH} = f(K_t)$, por ser o melhor modelo de estimativa da irradiação total na superfície inclinada.

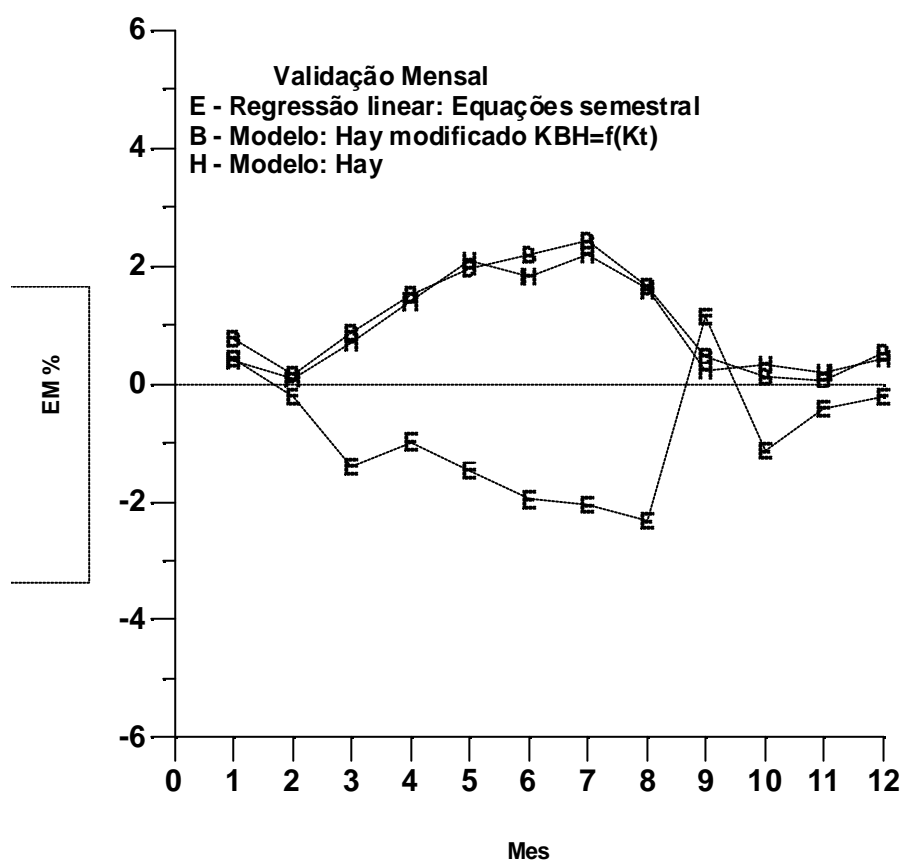


Figura 6.27. EM mensal para a irradiação total diária validada com os modelos de Hay, regressão linear semestral e Hay modificado por K_{BH} .

Na Figura (6.27) estão mostrados os EM para o três modelos, nota-se que o modelo de regressão linear semestral superestima os valores da irradiação total nos meses de janeiro e setembro e subestima nos outros meses do ano; no entanto, esses erros, em módulo, são bem menores daqueles obtidos com o modelo anual de regressão linear (Figura 6.21), e apresenta erro máximo em torno de 2% (subestimado) durante o inverno. Os modelos de Hay e Hay modificado por K_{BH} superestimam os valores em todos os meses do ano, e também apresentam erros máximos em torno de 2% durante o inverno.

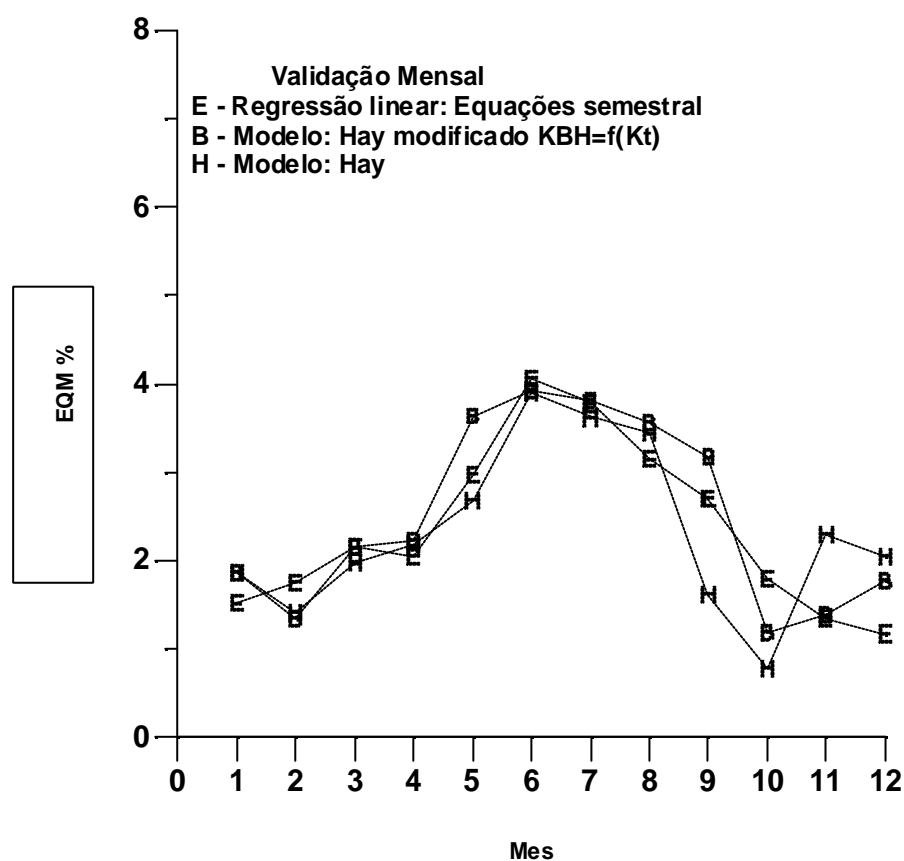


Figura 6.28. EQM mensal para a irradiação total diária validada com os modelos de Hay, regressão linear semestral e Hay modificado por K_{BH} .

Na Figura (6.28) estão mostrados os EQM para o três modelos, os valores obtidos com o modelo de regressão linear semestral são bem menores daqueles obtidos com o modelo anual de regressão linear Figura (6.22), e nesse caso a dispersão é praticamente igual para os três modelos, sendo menor durante a primavera e verão e maiores, em torno de 4%, durante o final do outono e início do inverno.

A análise dos erros demonstra que tanto o modelo estatístico, principalmente com as equações obtidas semestralmente, quanto o modelo de Hay modificado por K_{BH} , podem estimar a irradiação total na superfície inclinada com razoável precisão quando comparados com os modelos de estimativa da irradiação total, sendo esses dois modelos equivalentes entre si na estimativa, no entanto o modelo estatístico não utiliza medidas da irradiação direta, sendo um modelo simples e eficiente na estimativa da irradiação total na superfície inclinada.

7 CONCLUSÕES

- A superfície inclinada com a face voltada para o Equador, em condições de céu claro, recebe uma quantidade maior de energia do que a superfície horizontal durante os meses do inverno e outono, com pico ao redor de 30%, e uma quantidade menor de energia, com pico ao redor de - 15%, durante a primavera e verão.
- Na avaliação dos modelos de estimativa da irradiação total que incide na superfície inclinada, utilizando partição diária de energia, os modelos de Temps & Coulson, Klucher e circunsolar apresentam pobre desempenho e não devem ser utilizados na estimativa da irradiação total diária na região de Botucatu-SP. Os modelos de Hay, Liu & Jordan, Perez et al. e Reindl et al., são compatíveis entre si, e apresentam bons resultados, sendo o modelo de Hay o que tem a melhor desempenho, e portanto, o mais indicado para a estimativa da irradiação total diária em Botucatu-SP.
- Os modelos de estimativa modificados por correlações empíricas na forma de $K_d = f(K_t)$ e

$K_{BH} = f(K_t)$, conservam as mesmas características dos modelos originais, sendo que é obtida melhorias significativas no modelo de Liu & Jordan, para ambos os métodos.

- Na validação anual e mensal, utilizando partição diária de energia, os resultados mostram que os modelos de estimativa modificados por $K_{BH} = f(K_t)$ são melhores do que os obtidos com a modificação, $K_d = f(K_t)$, e compatíveis com os modelos de estimativa originais.

- O modelo proposto de estimativa da irradiação total obtido através de regressão linear semestral,

com a correlação feita através de $\frac{H_{bTO}^d}{H_g^d} = f(R_B, K_t)$, é simples e eficiente na estimativa da

irradiação total diária na superfície inclinada, tendo resultados praticamente idênticos aos obtidos com os modelos de estimativa da irradiação total existentes na literatura, e com os mesmos modelos modificados por $K_{BH} = f(K_t)$.

- Como proposta de continuidade deste trabalho, é sugerido que as medidas sejam feitas simultaneamente para várias superfícies inclinadas com diferentes ângulos de inclinação e várias posições azimutais.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAGON, F.F. Um modelo matemático para avaliação da incidência de radiação solar em superfícies topográficas. Botucatu, 1990. 89p. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.

BEHR, H.D. Solar radiation on tilted south oriented surface validation of transfer-models. *Solar Energy*, v.61, n.6, p.399-413, 1997.

BUGLER, J.W. The determination of hourly insolation on an inclined plane using a diffuse irradiance model based on hourly measured global horizontal insolation. *Solar Energy*, v.19, p.477-91, 1977.

- FEUERMANN, D., ZEMEL, A. Validation of models for global irradiance on inclined planes. *Solar Energy*, v.48, n.1, p.59-66, 1992.
- 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.
- GARNIER, B.J., OHMURA, A. The evaluation on surface variations in solar radiation income. *Solar Energy*, v.13, p.21-34, 1970.
- GOPINATHAN, K.K. Solar radiation on inclined surfaces. *Solar Energy*, v.45, n.1, p.19-25, 1990.
- GUEYMARD, C. An anisotropic solar irradiance model for tilted surfaces and its comparison with selected engineering algorithms. *Solar Energy*, v.38, p.367-86, 1987.
- GUEYMARD, C. Mathematically integrable parameterization of clear-sky beam and global irradiances and its use in daily irradiation applications. *Solar Energy*, v.50, n.2, p.385-97, 1993.
- HAY, J.E. Calculation of monthly mean solar radiation for horizontal and inclined surfaces. *Solar Energy*, v.23, p.301-07, 1979.
- IQBAL, M. *An introduction to solar radiation*. Canada: Academic Press, 1983. 390p.

KAMBEZIDIS, H.D., PSILOGLOU, B.E., GUEYMARD, C. Measurements and models for total solar irradiance on inclined surface in Athens. *Solar Energy*, v.53, n.2, p.177-85, 1994.

KASTEN, F. A new table and approximate formula for relative optical air mass. *Arch. Meteorol. Geophys Bioklimatol. Ser. B*, v.14, p.206-23, 1966.

KLEIN, S.A., BECKMAN, W.A., DUFFIE, J.A. A design procedure for solar heating system analysis. *Solar Energy*, v.18, n.2, p.113-27, 1976.

KLEIN, S.A. Calculation of monthly average insolation on tilted surfaces. *Solar Energy*, v.19, p.325-29, 1977.

KLUCHER, T.M. Evaluation of models to predict insolation on tilted surfaces. *Solar Energy*, v.23, p.111-14, 1979.

LIU, B.Y.H., JORDAN, R.C. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. *Solar Energy*, v.4, p.1-19, 1960.

LIU, B.Y.H., JORDAN, R.C. The long term average performance flat plate solar energy collectors. *Solar Energy*, v.7, p.53-74, 1963.

- NOTTON, G., MUSELLI, M., LOUCHE, A. Two estimation methods for monthly mean hourly total irradiation on tilted surfaces from monthly mean daily horizontal irradiation from solar radiation data of Ajaccio, Corsica. *Solar Energy*, v.57, n.2, p.141-53, 1996.
- OLIVEIRA, A.P., ESCOBEDO, J.F., MACHADO, A.J, SOARES, J. Correlation models of diffuse solar-radiation applied to city of São Paulo, Brazil. *Applied Energy*, v.71, p.59-73, 2002.
- PEREZ, R., SEALS, R. A new simplified version of the Perez diffuse irradiance model for tilted surfaces. *Solar Energy*, v.39, n.3, p.221-31, 1987.
- PEREZ, R., STEWART, R., ARBOGAST, C., SEALS, R. SCOTT, J. An anisotropic hourly diffuse radiation model for sloping surfaces: Description, performance validation, site dependency evaluation. *Solar Energy*, v.36, n.6, p.481-97, 1986.
- REINDL, D.T., BECKMAN, W.A., DIFFIE, J.A. Evaluation of hourly tilted surface radiation models. *Solar Energy*, v.45, n.1, p.9-17, 1990.
- REVFEIM, K.J.A A simple procedure for estimating global daily radiation on any surfaces. *J. Appl. Meteor*, v.17, n.1, p.1126-31, 1978.

RICIERI, R.P. Modelos de estimativas e avaliação dos métodos de medida da radiação solar difusa.

Botucatu, 1998. 89p. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.

SKARTVEIT, S., OLSETH, J.A. Modelling slop irradiance at high latitudes. *Solar Energy*, v.36, p.333-44, 1986.

TEMPS, R.C., COULSON, K.L. Solar radiation incident upon slopes of different orientations. *Solar Energy*, v.19, p.179-84, 1977.

UTRILLAS, M.P., LOZANO, J. M.. Performance evaluation of several versions of the Perez tilted diffuse irradiance model. *Solar Energy*, v.53, p.155-62, 1994.

WILMOTT, C. J. On the climate optimization of the tilt and azimuth of flat-plate solar collectors. *Solar Energy*, v.28, p.305-66, 1982.