



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Botucatu



CAMILA PIACITELLI TIEGHI

**RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL EM SUPERFÍCIES VERTICAIS: MEDIDAS E
MODELOS DE ESTIMATIVA**

Botucatu

2018

CAMILA PIACITELLI TIEGHI

**RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL EM SUPERFÍCIES VERTICAIS: MEDIDAS E
MODELOS DE ESTIMATIVA**

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Agronomia (Energia na Agricultura).

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Dal Pai

Botucatu

2018

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

T429r Tiegghi, Camila Piacitelli, 1988-
Radiação solar global em superfícies verticais: medidas e modelos de estimativa / Camila Piacitelli Tiegghi. - Botucatu: [s.n.], 2018
63 p.: fots. color., grafs. color., ils. color., tabs.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu, 2018
Orientador: Alexandre Dal Pai
Inclui bibliografia

1. Radiação solar (Medição). 2. Efeito estufa (Atmosfera). 3. Modelagem gráfica (Estatística). I. Dal Pai, Alexandre. II. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Câmpus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agronômicas. III. Título.

Elaborada por Ana Lucia G. Kempinas - CRB-8:7310

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte"

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL EM SUPERFÍCIES VERTICAIS: MEDIDAS E MODELOS DE ESTIMATIVA

AUTORA: CAMILA PIACITELLI TIEGHI

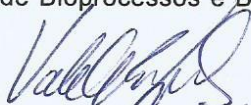
ORIENTADOR: ALEXANDRE DAL PAI

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em AGRONOMIA (ENERGIA NA AGRICULTURA), pela Comissão Examinadora:



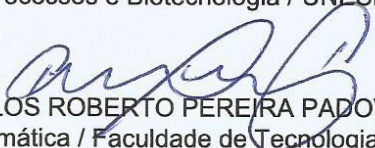
Prof. Dr. ALEXANDRE DAL PAI

Departamento de Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia / Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu - UNESP



Profa. Dra. VALERIA CRISTINA RODRIGUES SARNIGHAUSEN

Depto de Bioprocessos e Biotecnologia / UNESP - Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu



Prof. Dr. CARLOS ROBERTO PEREIRA PADOVANI

Depto de Informática / Faculdade de Tecnologia de Botucatu

Botucatu, 31 de agosto de 2018

*À minha amada família, dedico este trabalho,
pelo apoio e incentivo em todos os momentos.
À minha filha Manuela, que me foi concedida
por Deus durante este mestrado.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus por me permitir acesso aos conhecimentos e experiência adquirida ao longo deste mestrado.

À minha família pelo apoio e incentivo, em especial ao meu marido Marcos e minha mãe Marcia, que estiveram presentes em todas as etapas desta conquista.

Ao Prof. Dr. Alexandre Dal Pai, pela orientação, incentivo, que transmitiu seus conhecimentos com bom humor e paciência, apesar de sua atarefada rotina.

Ao CNPQ – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pela bolsa de estudos concedida.

“...A coisa mais bela que podemos vivenciar é o mistério. Ele é fonte fundamental de toda verdadeira arte e de toda ciência. Aquele que não o conhece e não mais se maravilha, paralisado em êxtase, é como se estivesse morto: seus olhos estão fechados. Eu quero saber como Deus pensa. O resto... são detalhes.”

[Albert Einstein]

RESUMO

A radiação solar é uma fonte energética vital de todos processos biológicos, químicos, físicos e atmosféricos. Além disso, atualmente, com uma preocupação crescente em relação à utilização de fontes alternativas e sustentáveis de energia, seu uso tem sido utilizado como uma boa solução para conversão energética, controle de temperatura de água e conforto térmico. Para cada local onde será feito o uso da radiação solar, é preciso conhecer a variação anual dos níveis quantitativos energéticos incidentes, pois em cada região do planeta, o comportamento da radiação solar global incidente apresenta diferentes variações anuais. Quando se trabalha em uma superfície inclinada, a orientação e o ângulo da inclinação da superfície alteram os níveis energéticos recebidos se comparados com uma superfície horizontal. Medidas da radiação solar em plano inclinado não são corriqueiras em estações meteorológicas devido à entraves financeiros, de instrumentação e de operação. Por este motivo, o potencial energético e térmico da radiação solar em superfície vertical é deixado de lado. Este trabalho teve como objetivo avaliar os dados da irradiação solar global em superfície vertical orientada ao Norte medidos durante o ano de 2010 na estação de radiometria do Departamento de Engenharia Rural da Faculdade de Ciências Agrônomicas da UNESP de Botucatu. No capítulo 1, foi criada uma evolução das medidas da radiação solar global em superfície vertical comparada com superfície horizontal, afim de se adquirir níveis quantitativos de irradiação solar global em superfície vertical no decorrer do ano para Botucatu-SP. A média dos valores da irradiação solar global em superfície horizontal foi de 17,12 MJ/m² enquanto a média para irradiação solar global vertical foi de 10,88 MJ/m². No capítulo 2, foram testados modelos clássicos da literatura para a estimativa da irradiação global desenvolvidos em superfícies inclinadas e foram comparados com dados da estação de radiometria de Botucatu-SP medidos em superfície vertical. No final do capítulo, foi proposto um modelo de estimativa da irradiação solar global para superfície vertical para Botucatu-SP.

Palavras-chave: Inclinada, Irradiação Solar Global, Modelagem, Vertical.

ABSTRACT

Solar radiation is a vital energy source of all biological, chemical, physical and atmospheric processes. In addition, currently, with increasing concern about the use of alternative and sustainable sources of energy, its use has been used as a good solution for energy conversion, water temperature control and thermal comfort. For each place where the use of solar radiation will be made, it is necessary to know the annual variation of the quantitative energy levels incident, because in each region of the planet, the behavior of the incident global solar radiation presents different annual variations. When working on a sloping surface, the orientation and angle of the slope of the surface change the energy levels received when compared to a horizontal surface. Measurements of solar radiation on an inclined plane are not commonplace in meteorological stations due to financial, instrumentation and operational barriers. For this reason, the energetic and thermal potential of solar radiation on vertical surfaces is ignored. The objective of this work was to evaluate the global solar irradiance data on a vertical surface oriented to the North measured during the year 2010 in the radiometric station of the Department of Rural Engineering of the Faculty of Agronomic Sciences of UNESP of Botucatu. In Chapter 1, an evolution of global solar radiation measurements on vertical surface was created compared to horizontal surface, in order to obtain quantitative standards of vertical solar irradiation throughout the year for the Botucatu-SP region. The mean values of global solar irradiance on the horizontal surface were 17.12 MJ / m^2 while the average for vertical global solar irradiance was 10.88 MJ / m^2 . In chapter 2, classical literature models were tested for the estimation of global irradiance developed on inclined surfaces and were compared with Botucatu-SP radiometry station data measured on vertical surface. At the end of the chapter, a model of estimation of global solar irradiance for vertical surface was proposed for Botucatu-SP.

Key words: Tilt, Global Solar Irradiation, Modeling, Vertical.

LISTA DE SÍMBOLOS

I_{sc}	Constante solar (1367 W/m^2)
θ_z	Ângulo zenital do Sol (graus)
α	Altura solar (graus)
ψ	Azimute solar (graus)
ω	Ângulo horário (graus)
β	Inclinação da superfície (graus)
γ	Ângulo de azimute da superfície (graus)
θ	Ângulo de incidência para uma superfície arbitrariamente orientada (graus)
ϕ	Latitude (graus)
θ_0	Ângulo de incidência para uma superfície voltada para o Equador (graus)
$H_{\beta T}^d$	Irradiação solar total diária (MJ/m^2)
$H_{\beta b}^d$	Irradiação direta (MJ/m^2)
$H_{\beta d}^d$	Irradiação difusa (MJ/m^2)
$H_{\beta r}^d$	Irradiação refletida pelo solo (MJ/m^2)
H_{bh}^d	Irradiação direta projetada na horizontal (MJ/m^2)
H_g^d	Irradiação global horizontal (MJ/m^2)
H_d^d	Irradiação difusa horizontal (MJ/m^2)
H_b^d	Irradiação direta na horizontal (MJ/m^2)
H_0^d	Irradiação extraterrestre na superfície horizontal (MJ/m^2)
$H_{0\beta}$	Irradiação solar extraterrestre para superfície vertical (MJ/m^2)
R_B	Fator de correção devido à mudança no ângulo de incidência dos raios solares sobre a superfície inclinada
ω'_s	Ângulo horário para superfície vertical (graus)
ω_s	Ângulo horário para superfície horizontal (graus)
ω_v	Ângulo horário para latitude simulada (graus)
δ	Declinação solar
ρ	Albedo da superfície
K_d	Razão entre a irradiação difusa e a irradiação global

F	Função modeladora
A_I	Índice anisotrópico
I_c	Irradiação difusa circunsolar
I_{si}	Irradiação difusa isotrópica
Δ	Índice atmosférico
m_r	Massa ótica do ar
e	índice de turbidez de céu
F_1	Irradiação difusa circunsolar
F_2	Irradiação difusa horizontal
H_{SC}	Constante solar integrada na hora ($4,921MJ/m^2$)
E_0	Excentricidade da órbita terrestre
μ	Média
σ	Desvio-padrão
x_i	Cada um dos dados observados
N	Quantidade total de dos dados avaliados

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL.....	19
APRESENTAÇÃO.....	19
REVISÃO DE LITERATURA.....	20
IRRADIAÇÃO SOLAR.....	20
COMPONENTES DA IRRADIAÇÃO SOLAR.....	21
POSIÇÃO DO SOL EM RELAÇÃO ÀS SUPERFÍCIES HORIZONTAIS.....	21
POSIÇÃO DO SOL EM RELAÇÃO ÀS SUPERFÍCIES ARBITRARIAMENTE INCLINADAS.....	22
SUPERFÍCIES INCLINADAS VOLTADAS PARA O EQUADOR.....	23
R _b	25
CAPITULO 1: EVOLUÇÃO DAS MEDIDAS DA RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL EM SUPERFÍCIE VERTICAL.....	26
1.1 INTRODUÇÃO.....	26
1.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	27
1.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	30
1.3.1 EVOLUÇÃO TEMPORAL DAS MEDIDAS DA IRRADIAÇÃO SOLAR EM SUPERFÍCIE VERTICAL E HORIZONTAL.....	30
1.3.2 EVOLUÇÃO DIURNA DAS MEDIDAS DA IRRADIAÇÃO SOLAR EM SUPERFÍCIE VERTICAL E HORIZONTAL.....	36
1.4 CONCLUSÃO.....	37
REFERÊNCIAS.....	39
CAPITULO 2: MODELOS DE ESTIMATIVA DA IRRADIAÇÃO SOLAR GLOBAL EM SUPERFÍCIE VERTICA.....	40
2.1 INTRODUÇÃO.....	40
2.2 MATERIAIS E MÉTODOS.....	42
2.2.1 LOCAL E CLIMA.....	42
2.2.2 INSTRUMENTAÇÃO E CONTROLE DE QUALIDADE.....	43
2.2.3 MODELAGEM.....	43
2.2.4 INDICATIVOS ESTATÍSTICOS.....	47
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	48

2.3.1	ANÁLISE DOS MODELOS DA LITERATURA.....	48
2.3.2	MODELO PROPOSTO.....	54
2.4	CONCLUSÃO.....	57
	REFERENCIAS.....	58
	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	60
	REFERÊNCIAS.....	63

INTRODUÇÃO GERAL

APRESENTAÇÃO

A irradiação solar é fonte energética primária de todos processos biológicos, químicos, físicos e atmosféricos, imprescindível para que haja vida na Terra. Também é fonte acessível e renovável de energia, a qual pode ser utilizada para conversão energética, controle de temperatura de água e conforto térmico. Para qualquer que seja seu uso, é preciso conhecer a variação anual dos níveis quantitativos energéticos incidentes na região onde se pretende captar a radiação solar, pois em cada região do planeta, o comportamento da radiação solar apresenta diferentes variações anuais. (CUCUMO et al, 2006, p. 692; DAL PAI, 2005, p. 7; HALAWA; VAN HOOFF; SOEBARTO, 2014, p. 905; MOHAMMADI; KHORASANIZADEH, 2015, p. 504; SCOLAR, 2003, p. 5).

Medidas da radiação solar em plano inclinado não são corriqueiras em estações meteorológicas devido à entraves financeiros, de instrumentação e de operação. Por este motivo, o potencial energético e térmico da radiação solar em superfície vertical é deixado de lado.

Este trabalho será apresentado em dois capítulos, sendo que no capítulo 1, será abordado o tema: EVOLUÇÃO DAS MEDIDAS DA RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL EM SUPERFÍCIE VERTICAL. Neste capítulo, foi realizada uma comparação entre as medidas das irradiações solares globais em superfície vertical e horizontal, utilizando dados medidos durante o ano de 2010. Foi feito o cálculo das irradiações solares extraterrestre em superfície vertical e horizontal e foram comparados os dados medidos e calculados, afim de propor uma série temporal da irradiação solar global em superfície vertical para a região de Botucatu-SP. Este primeiro capítulo será submetido à revista Revista Brasileira de Ciências Agrárias (RBCA) (ISSN (ON LINE) 1981-0997), a qual possui nível B1 pela classificação de periódicos quadriênio 2013-2016 Qualis CAPES, na área de CIÊNCIAS AGRÁRIAS I.

No capítulo 2, será abordado o tema: MODELOS DE ESTIMATIVA DA IRRADIAÇÃO SOLAR GLOBAL EM SUPERFÍCIE VERTICAL, no qual são testados modelos clássicos da literatura para a estimativa da irradiação global desenvolvidos em superfícies inclinadas com dados da estação de radiometria de Botucatu-SP medidos em superfície vertical. No final do capítulo, foi proposto um modelo de

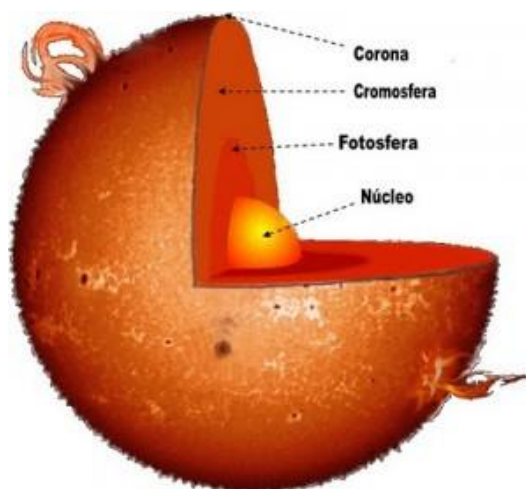
estimativa da irradiação solar global para superfície vertical para Botucatu-SP. Este segundo capítulo será submetido à revista RENEWABLE ENERGY, a qual possui nível A2 pela classificação de periódicos quadriênio 2013-2016 Qualis CAPES, na área de CIÊNCIAS AGRÁRIAS I.

REVISÃO DE LITERATURA

IRRADIAÇÃO SOLAR

A irradiação solar é uma fonte de energia limpa e renovável. O aproveitamento da irradiação solar é utilizado em inúmeras áreas, tais como Agronomia, Arquitetura, Zootecnia, Engenharias Florestal, Civil e Elétrica ou qualquer outra área que possa aproveitar a irradiação do Sol como fonte de energia ou calor.

Figura 1 - O Sol e suas camadas



Com temperatura de 6.000K, o Sol, uma esfera gasosa, em sua superfície fotosfera mede 1×10^6 K e 1×10^7 K na corona. Sua elevada temperatura interior emite grande quantidade de energia, causado pela conversão de hidrogênio em hélio.

A energia que incide no topo da atmosfera terrestre é apenas 0,5x10-7% do total de 62×10^3 kW/m² da energia que o Sol emite. Corresponde à $1,6 \times 10^{24}$ kW. (COULSON, 1975, p. 39; DAL PAI, 2005, p. 10).

A irradiação solar ao incidir no topo da atmosfera, é chamada de irradiação solar extraterrestre e corresponde a constante solar ($I_{sc}=1.367$ W/m²), multiplicada

pelo cosseno do ângulo zenital (θ_z) (ângulo formado entre os raios solares e a vertical local) (DAL PAI, 2005, p. 11).

COMPONENTES DA IRRADIAÇÃO SOLAR

A irradiação solar incidente em determinado instante e local é chamada de irradiação solar global, que pode ser dividida em duas porções: a porção de irradiação solar direta e a porção da irradiação solar difusa (VAREJÃO SILVA, 2006, p. 206).

A irradiação solar direta é uma fração da irradiação global, que provém do disco solar quando este está total ou parcialmente visível, já a irradiação solar difusa é a outra fração da irradiação global, que é produzida a partir da ação de espalhamento causado na atmosfera local, sofrendo um ou mais desvios até incidir sobre um local (VAREJÃO SILVA, 2006, p. 206).

Para superfícies inclinadas, também deve-se levar em consideração a irradiação solar refletida, chamada de albedo da superfície. Esta é uma fração da irradiação global que é refletida quando incide sobre um local inclinado em relação ao chão. O albedo varia de acordo com os componentes físicos (cor, rugosidade, etc) e do ângulo zenital (VAREJÃO SILVA, 2006, p. 222).

POSIÇÃO DO SOL RELATIVA ÀS SUPERFÍCIES HORIZONTAIS

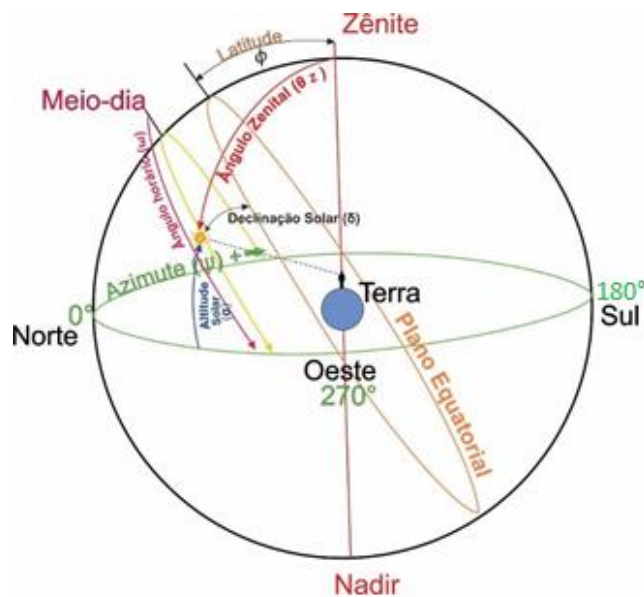
Para calcular a irradiação solar que incide em uma superfície horizontal na Terra, é necessário considerar as relações trigonométricas entre a posição solar no céu e as coordenadas de superfície na Terra. Por exemplo, podemos descrever um observador na Terra desenhando uma esfera celeste com a Terra no centro. Em qualquer momento, um observador na superfície da Terra tem uma posição correspondente na esfera celeste, chamada zênite do observador. Este é o ponto de intersecção com a esfera celeste de uma perpendicular à superfície da Terra na posição do observador.

O ponto diagonalmente oposto ao zênite local é chamado de nadir. O ângulo zenital (θ_z) é o ângulo entre o zênite local e a linha que une o observador ao Sol. É um ângulo entre 0° e 90° . A altitude solar (α), também chamada de elevação solar, é a altura

angular do sol acima do horizonte celeste do observador. É um ângulo entre 0° e 90° . A altitude solar é o complemento do ângulo zenital ($\alpha + \theta_z = 90^\circ$).

O azimute solar (ψ) é ângulo compreendido entre a direção Norte e a projeção da posição do Sol sobre o plano do horizonte. Ao Norte seu valor é 0° , ao Sul seu valor é 180° . O ângulo horário (ω) é o ângulo compreendido entre o plano do meridiano que contém o ponto de interesse e o plano do meridiano que contém o Sol. Contando a partir do meio-dia, altera-se em 15° por hora até o pôr-do-sol. A Figura 2 apresenta a Esfera Celestial e as Coordenadas do Sol em relação ao observador na Terra (IQBAL, 1983, p. 14).

Figura 2 - Esfera celestial e Coordenadas do Sol em relação ao observador na Terra.

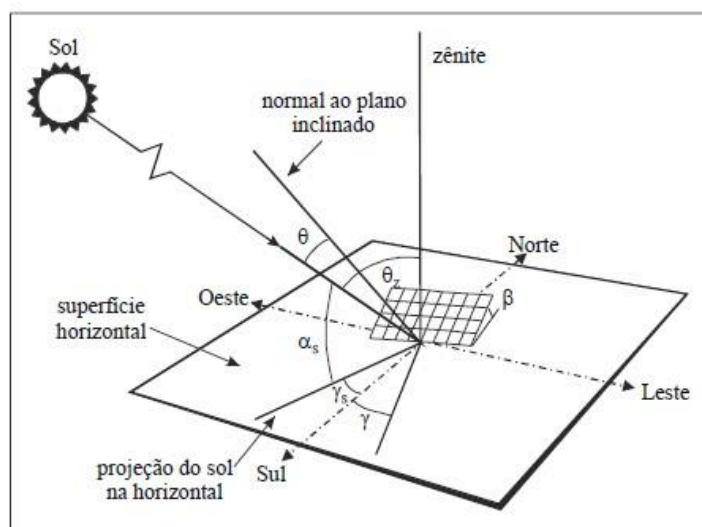


Fonte: Adaptado de IQBAL, 1983.

POSIÇÃO DO SOL EM RELAÇÃO ÀS SUPERFÍCIES ARBITRARIAMENTE INCLINADAS

Para determinar a posição do Sol em relação à uma superfície arbitrariamente inclinada (não necessariamente inclinado ao Equador), é necessário regular a inclinação da superfície em relação à posição horizontal e sua orientação em relação ao meridiano local (IQBAL, 1983, p. 20). A Figura 3 representa a posição do Sol em relação à uma superfície arbitrariamente inclinada.

Figura 3 - Posição do Sol em relação à uma superfície inclinada



Fonte: Adaptado de IQBAL, 1983.

Na Figura 2 pode-se observar as seguintes medidas:

- β é a inclinação da superfície, medida a partir da posição horizontal, em graus.
- γ é o ângulo de azimute da superfície. Esse é o desvio do normal para a superfície em relação ao Sul, leste negativo e oeste positivo ($-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$).
- γ_s é o azimute solar. Esse é o desvio da projeção do Sol na horizontal em relação ao Sul, leste negativo e oeste positivo ($-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$)
- θ é o ângulo de incidência para uma superfície arbitrariamente orientada, o ângulo entre a superfície normal e o vetor So I-Terra, em graus.
- θ_z é o ângulo zenital. Ângulo entre a trajetória de incidência direta da irradiação solar e uma linha vertical.
- α_s é a altitude solar. Ângulo entre a trajetória de incidência direta da irradiação solar e a horizontal ($\alpha_s = 90^\circ - \theta_z$) (IQBAL, 1983, p. 21).

SUPERFÍCIES INCLINADAS VOLTADAS PARA O EQUADOR

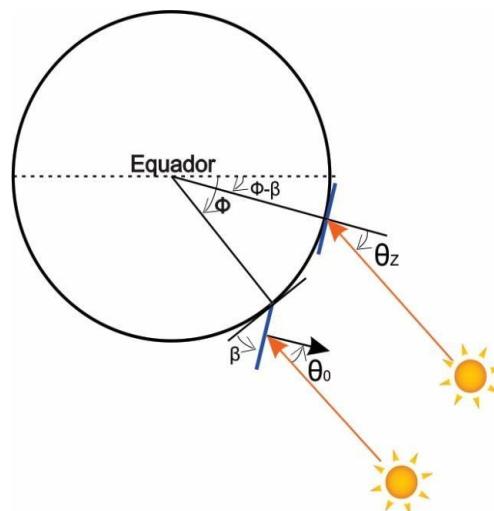
O conhecimento dos níveis de irradiação solar em superfícies verticais é importante para áreas estratégicas como conforto térmico, arquitetura, engenharia civil e elétrica. O ganho energético, devido à incidência solar vertical nas paredes das construções, permite otimizar o dimensionamento de aberturas de ambientes, além

de orientar a fixação de painéis fotovoltaicos (GONZÁLEZ-PARDO et al., 2013, p. 447; TAKEBAYASHI et al, 2015, p. 363). Como o estudo foi realizado no hemisfério sul, orienta-se as superfícies ao norte no sentido de se maximizar a incidência energética devido à declinação solar em meses do inverno.

No hemisfério Sul, ao se inclinar uma superfície para o Norte (Equador), simula-se uma superfície horizontal em latitude maior, visando maximizar o ganho energético da irradiação solar, principalmente nos meses de inverno. Devido à declinação solar, nos meses de inverno para o hemisfério Sul, o Sol ilumina a região Norte do planeta. Por este motivo, painéis fotovoltaicos e painéis térmicos são posicionados ao Norte no hemisfério Sul. Visando o conforto térmico, arquitetos projetam construções de moradias levando em consideração a declinação solar local, projetando os ambientes tais como quartos voltados para as fachadas ao Norte, afim de proporcionar ganho de calor nos meses de inverno.

Seja θ_0 o ângulo de incidência para uma superfície voltada para o Equador, em graus. Considere a figura 4 mostrando duas superfícies localizadas nas latitudes ϕ e $\phi + \beta$. A superfície à latitude ϕ está inclinada num ângulo β , enquanto que a superfície à latitude $\phi + \beta$ esta na horizontal. Uma superfície localizada na latitude ϕ e inclinada em direção ao equador no ângulo β da posição horizontal é paralela a uma superfície horizontal à latitude $\phi + \beta$. Portanto, θ_0 na latitude ϕ é igual a θ_z na latitude $\phi + \beta$ (IQBAL, 1983, p. 20).

Figura 4 - Superfície inclinada voltada para o Equador



Fonte: Adaptado de IQBAL, 1983.

R_B

R_B é um fator de correção utilizado para obter-se a componente da radiação solar direta incidente em planos inclinados. É necessário utilizar este fator de correção devido à mudança no ângulo de incidência dos raios solares na superfície inclinada (IQBAL, 1983, p. 78). O R_B diário é calculado conforme a equação a seguir:

$$R_B = \frac{\left(\frac{\pi}{180}\right) \omega'_s \operatorname{sen}(\delta) \operatorname{sen}(\phi + \beta) + \cos(\delta) \cos(\phi + \beta) \operatorname{sen} \omega'_s}{\left(\frac{\pi}{180}\right) \omega_s \operatorname{sen}(\delta) \operatorname{sen}(\phi) + \cos(\delta) \cos(\phi) \operatorname{sen} \omega_s} \quad (3)$$

Onde ϕ é a Latitude, β é o ângulo de inclinação da superfície, ω'_s é o ângulo horário para superfície vertical (eq. 4 do capítulo 1) e ω_s o ângulo horário para superfície horizontal (eq. 2 do capítulo 1) e δ é a declinação solar, dada pela equação 4.

$$\delta = 23,45 \operatorname{sen}\left(\frac{360}{365}(284 + Dj)\right) \quad (4)$$

Onde Dj é o dia juliano.

CAPITULO 1: EVOLUÇÃO DAS MEDIDAS DA RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL EM SUPERFÍCIE VERTICAL

Camila Piacitelli Tieghi – camilapiacitelli@yahoo.com.br

Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu, Departamento de Bioprocessos e Biotecnologia

Alexandre Dal Pai – adalpai@fca.unesp.br

Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu, Departamento de Bioprocessos e Biotecnologia

1.1 INTRODUÇÃO

A irradiação solar incidente em determinado local varia ao longo do ano. Os movimentos de rotação e translação da Terra são responsáveis por esta variação, que modificam a declinação solar, o ângulo horário diário e fotoperíodo, e conseqüentemente alteram os níveis de irradiação Extraterrestre incidente (H_0) [1]. No caso de superfícies inclinadas, a quantidade de irradiação solar é diferente se comparado com a horizontal [2]. Por causa da geometria solar, a inclinação de uma superfície orientada ao Equador em uma determinada latitude, simula a incidência solar em uma latitude diferente da local (latitude maior no caso do Hemisfério Sul e latitudes menores no caso do Hemisfério Norte), a qual é calculada mediante a soma da latitude local com o ângulo de inclinação. Os níveis anuais quantitativos de irradiação solar variam de acordo com a sazonalidade. Além disso, os níveis de irradiação que incidem em superfícies horizontais são diferentes dos níveis de irradiação incidentes em superfícies inclinadas ao longo do ano. São raros os estudos relacionados a irradiação solar global em superfície vertical, pelos entraves financeiros, de instrumentação e de operação. A maioria das estações radiométricas possuem medidas apenas do plano horizontal, deixando de lado o potencial solar do plano vertical. A estação de radiometria da UNESP de Botucatu possui medidas da irradiação solar em superfície horizontal e em superfícies inclinadas em direção ao norte, sendo uma inclinada com ângulo igual a latitude local e outra inclinada na vertical. O objetivo deste estudo visou calcular a irradiação solar extraterrestre em plano horizontal e inclinado na vertical ao Norte e avaliar os dados da irradiação solar global medidos durante o ano de 2010, afim de avaliar a variação sazonal da irradiação solar global em superfície vertical para a região de Botucatu-SP.

1.2 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo é baseado em medidas da irradiação global em planos horizontal e vertical orientado ao Norte geográfico, situado na estação de radiometria do Departamento de Engenharia Rural da Faculdade de Ciências Agrônomicas da UNESP de Botucatu (latitude 22° 54' S, longitude 48° 27' O e altitude 716 m). Foram utilizados os dados medidos no ano de 2010. A cidade de Botucatu tem cerca de 130.000 habitantes e é rodeada por uma formação de relevo assimétrico denominada Cuesta de Botucatu e pelas bacias hidrográficas do Tietê e do Paranapanema. De acordo com a classificação climática de Köppen, o clima local é o Cwa (clima subtropical úmido), com verão quente, úmido e chuvoso e inverno seco e de temperaturas amenas. Os valores de temperatura e umidade relativa seguem as variações astronômicas, com valores máximos de temperatura e umidade relativa em fevereiro (23,12 °C e 78,25% respectivamente) e valores mínimos de temperatura em julho (17,10 °C) e umidade relativa em agosto (63,97%). A estação chuvosa ocorre no verão e primavera, acompanhada de elevada nebulosidade. Cerca de 80% da precipitação anual ocorre nesse período, com máxima no mês de janeiro (246,2 mm). Nas estações do inverno e outono, a precipitação média é inferior a 100 mm mensais, com mínima em agosto (36,1 mm) [3].

Os valores das irradiâncias solares foram monitorados por um sistema de aquisição de dados automático modelo Datalogger 23X da empresa Campbell Scientific Inc com frequência de varredura de 0,2Hz. Para a obtenção dos valores das irradiâncias solares diárias, foram calculados os valores médios a cada 5 minutos e armazenados no formato W/m².

A irradiância solar global em superfície horizontal foi medida com piranômetro Eppley-PSP. A irradiância solar global no plano vertical foi medida com piranômetro Kipp-Zonen – CM3. Para medir a irradiância global em superfície vertical, o piranômetro foi posicionado sobre plano inclinado à 90° com a face voltada para o Norte. A realização de todos os cálculos e indicadores estatísticos foram através do *software Origin*. As figuras 1 e 2 mostram os piranômetros em superfície horizontal e em superfície vertical.

Figura 1 - Piranômetro Eppley-PSP em superfície horizontal



Figura 2 - Piranômetro Kipp-Zonen CM3 em superfície vertical



O procedimento de cálculo das irradiações solares Extraterrestres na partição de tempo diária nos planos horizontal (H_0) e inclinado ($H_0 90$) estão descritos a seguir [2]:

Para superfície horizontal, foi calculada irradiação solar Extraterrestre (H_0), dada pela seguinte equação:

$$H_0^d = \left(\frac{24}{\pi}\right) H_{SC} E_0 \text{sen}(\phi) \text{sen}(\delta) \left[\left(\frac{\pi}{180}\right) \omega_s - \tan(\omega_s) \right] \quad (1)$$

Onde ϕ é a latitude, δ é a declinação solar, $H_{SC}=4,921\text{MJ/m}^2$ é a constante solar integrada na hora e E_0 é a excentricidade da órbita terrestre.

Na superfície inclinada, os cálculos foram efetuados levando em conta a latitude simulada, por meio da soma entre o ângulo de inclinação da superfície e latitude local. Deste modo, é necessário realizar ajustes para não afetar fisicamente a integridade dos valores da irradiação solar nesta superfície. Assim, o ângulo horário em superfície vertical (90°) (ω'_s) é selecionado entre o menor valor entre os ângulos horários diários da superfície horizontal e vertical (ω_s) e ângulo horário da latitude

simulada (ω_v) [2]. A equação 2 fornece o cálculo do ângulo horário diário em superfície horizontal, a equação 3 mostra o cálculo do ângulo horário diário para latitude simulada, enquanto a equação 4 apresenta a escolha do menor valor entre os ângulos horários diários.

$$\omega_s = \text{arc. cos}[-\tan \phi \tan(\delta)] \quad (2)$$

$$\omega_v = \text{arc. cos}[-\tan \delta \tan(\phi - \beta)] \quad (3)$$

$$\omega'_s = \min\{\omega_v, \omega_s\} \quad (4)$$

Onde β é o ângulo de inclinação da superfície inclinada e ϕ é a latitude.

A equação 5 apresenta o cálculo da irradiação solar extraterrestre para superfície vertical ($H_{0\beta}$).

$$H_{0\beta} = \left(\frac{24}{\pi}\right) H_{SC} E_0 \left[\frac{\pi}{180} \omega_s \text{sen}(\delta) \text{sen}(\phi + \beta) + \cos(\delta) \cos(\phi + \beta) \text{sen}(\omega'_s)\right] \quad (5)$$

Os valores das irradiâncias solares global nas superfícies horizontal e vertical foram integrados para as partições energéticas de tempo diárias, transformando-se em irradiações ao converter W/m^2 para MJ/m^2 .

Os dados passaram por uma análise de consistência e os valores discrepantes provenientes de erros de leitura dos sensores foram removidos.

Para caracterização da evolução temporal das irradiações solares horárias, diárias e mensais foram adotadas medidas estatísticas de posição (Média (μ)) e de dispersão em torno da média (Desvio-padrão (σ)), dadas pelas equações (6) e (7), além dos valores máximos, mínimos e amplitude.

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} \quad (6)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (xi - \mu)^2}{N}} \quad (7)$$

Onde xi representa cada um dos dados observados de irradiância e N é quantidade total de dados avaliados.

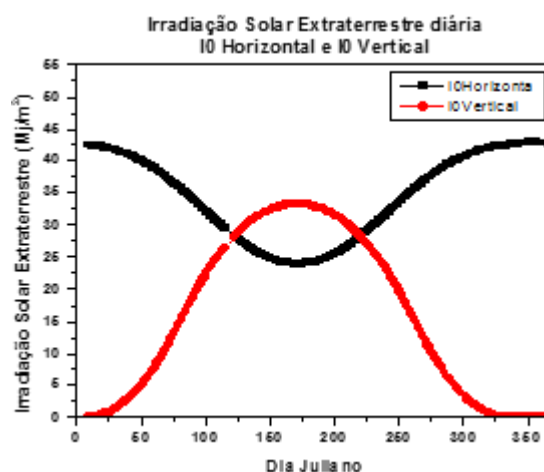
1.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

1.3.1 EVOLUÇÃO TEMPORAL DAS MEDIDAS DA IRRADIAÇÃO SOLAR EM SUPERFÍCIE VERTICAL E HORIZONTAL

A seguir, serão apresentadas as evoluções temporais das irradiações solares extraterrestre e global nas superfícies horizontal e vertical orientada para o Norte.

A Figura 3 mostra os valores da irradiação solar diária extraterrestre nas superfícies horizontal e vertical ao longo do ano. As curvas obtidas apresentam comportamento periódico, porém opostos entre si. Os valores de máximo de uma superfície coincidem com os valores de mínimo da outra superfície.

Figura 3 - Irradiações solares extraterrestre horizontal e vertical em relação aos dias do ano para partição diária



A Tabela 1 mostra os valores de mínimo, de máximo, o intervalo de variação (Δ) e os valores médios (μ) das irradiações solares extraterrestres horizontal e vertical para Botucatu.

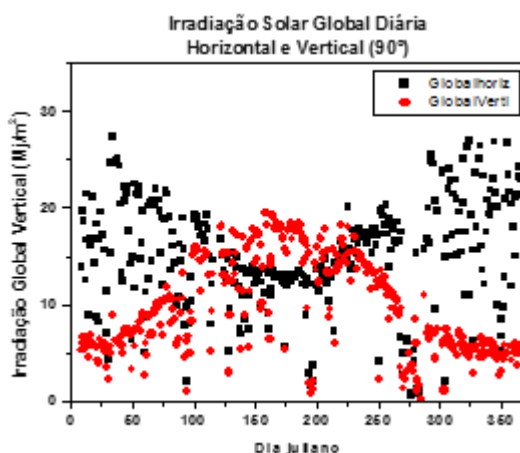
Tabela 1 - Valores de mínimo, de máximo, o intervalo de variação (Δ), os valores médios (μ) e desvio padrão (δ) das irradiações solares extraterrestres horizontal e vertical para Botucatu

Irradiação Solar	Mínimo (MJ/m²)	Máximo (MJ/m²)	Δ (MJ/m²)	μ (MJ/m²)	δ (MJ/m²)
H₀	23,97	42,90	18,93	34,45	6,81
H₀β	0	33,31	33,31	15,99	12,68

A superfície horizontal tem seu valor de mínimo de 23,97 MJ/m² ocorrendo no dia 20/06, coincidindo com o solstício de inverno. Já a superfície vertical apresenta valor mínimo de 0 MJ/m², o qual ocorre entre os dias 04/12 a 31/12, coincidindo com o começo do verão. Já para os valores de máximo, a superfície horizontal apresenta valor de 42,90 MJ/m² no dia 20/12 (início do verão) e a superfície vertical o valor de 33,91 MJ/m² para o dia 20/06 (início do inverno). Entre os dias 3/5 e 8/8, a irradiação solar extraterrestre vertical é maior que na superfície horizontal. São 97 dias, equivalentes à 26,5% do ano. Em relação ao intervalo de variação das irradiações extraterrestres, a superfície horizontal tem uma variação de 18,93 MJ/m², enquanto que a superfície vertical tem variação de 33,31 MJ/m², 78% da irradiação máxima horizontal. A amplitude energética da irradiação solar extraterrestre na superfície vertical é maior que a amplitude energética da irradiação solar extraterrestre na superfície horizontal. Ao inclinar a superfície em 90°, simula-se uma localidade de latitude elevada (67,4° N), com grande variação no fotoperíodo e, conseqüentemente, nos valores energéticos ao longo do ano. Tal localidade encontra-se no hemisfério Norte, o que justifica a coincidência de um valor mínimo de uma superfície com o valor máximo da outra. Já para os valores médios, incide 34,45 MJ/m² para a superfície horizontal, enquanto que para a superfície vertical, esse valor cai para 15,99 MJ/m².

A Figura 4 mostra os valores medidos da irradiação solar diária global na horizontal e vertical (90°) ao Norte, em relação aos dias do ano. O comportamento periódico acompanha o mesmo comportamento observado para as irradiações extraterrestres, tanto para as medidas horizontal e vertical. No entanto, observa-se também uma grande oscilação dos valores ao longo do ano, principalmente devido a dinâmica atmosférica das nuvens, que tem sua distribuição e concentração diferentes ao longo do ano [4].

Figura 4 - Valores medidos da irradiação solar diária global na horizontal e vertical (90°) ao Norte, em relação aos dias do ano



A Tabela 2 mostra os valores de mínimo, de máximo, o intervalo de variação e os valores médios das irradiações solares globais horizontal e vertical para Botucatu.

Tabela 2 - Valores de mínimo, de máximo, o intervalo de variação (Δ), os valores médios (μ) e desvio padrão (δ) das irradiações solares globais horizontal e vertical para Botucatu

Irradiação Solar	Mínimo (MJ/m²)	Máximo (MJ/m²)	Δ (MJ/m²)	Média (MJ/m²)	δ (MJ/m²)
H_{GH}	1,93	30,41	28,49	17,12	5,64
H_{GV}	0,95	21,36	20,41	10,88	5,26

A irradiação global horizontal tem seu valor de mínimo de 1,93 MJ/m² para o dia 14/07. A irradiação solar global vertical apresenta valor mínimo de 0,95 MJ/m², também para o mesmo dia 14/07. Já para os valores de máximo, a superfície horizontal apresenta valor de 30,41 MJ/m² no dia 02/02 e para a superfície vertical valor de 21,36 MJ/m² no dia 07/06. Em função da geometria solar, a irradiação solar global horizontal tem seus maiores valores ocorrendo nos meses do verão, enquanto que para a irradiação solar global vertical os maiores valores ocorrem no inverno devido à inclinação da superfície. Entre os dias 1/5 à 11/8, a irradiação solar global vertical é maior que a irradiação solar global horizontal, isso é equivalente à 27,9% de um ano.

Já a variabilidade observada para os pontos deve-se à dinâmica atmosférica, que é diferente para cada época do ano. Verão, com maior nebulosidade, apresenta maior dispersão dos pontos. Porém, para a irradiação solar global vertical, a maior dispersão dos pontos ocorreu no inverno. Apesar do verão apresentar condições

atmosféricas mais complexas devido à nebulosidade, o sensor posicionado na superfície vertical tem dificuldade de captar a incidência direta da irradiação. Neste período, os raios solares incidentes na superfície horizontal são mais perpendiculares por causa da declinação solar, o que compromete o ângulo de visão do sensor posicionado em uma superfície vertical.

Portanto, a irradiação medida na superfície vertical é composta basicamente das parcelas difusa e refletida, as quais são mais uniformes, justificando a menor variabilidade para esta época do ano.

Em relação ao intervalo de variação das irradiações globais, a superfície horizontal tem uma variação de 28,49 MJ/m², enquanto que a superfície vertical tem variação de 20,41 MJ/m² [5-7]. Já para os valores médios, incide 17,12 MJ/m² para a superfície horizontal, enquanto que para a superfície vertical, esse valor cai para 10,88 MJ/m². Para o aproveitamento da irradiação solar durante o ano, entre os meses de maio à 11 de agosto, a melhor inclinação da superfície é na vertical, enquanto que para o restante dos meses do ano, a melhor inclinação da superfície é a horizontal.

Para aplicações que demandam partição de tempo maiores, os dados diários das irradiações solares nas superfícies horizontal e vertical foram convertidos para valores médio-mensais. A figura 5 mostra os valores médio-mensais e seus respectivos desvio-padrões das irradiações solares extraterrestre nas superfícies horizontal e vertical, enquanto que a Figura 6 mostra os valores médio-mensais e seus respectivos desvio-padrões das irradiações solares global das superfícies horizontal e vertical.

Figura 5 - Irradiação Solar Extraterrestre média mensal e desvio padrão em superfície horizontal e vertical orientada ao Norte

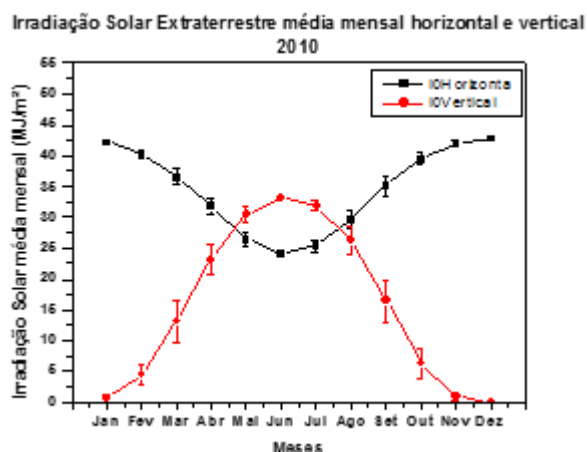
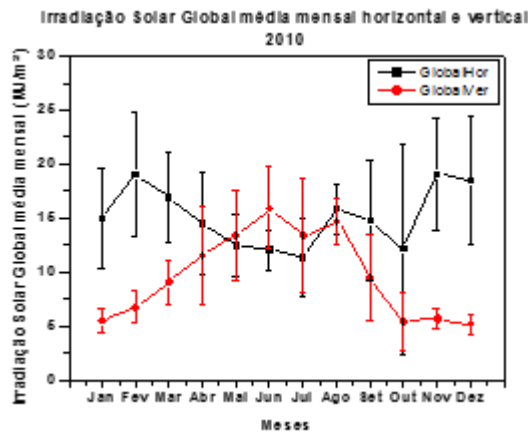


Figura 6 - Irradiação Solar Global média mensal e desvio padrão em superfície horizontal e vertical orientada ao Norte em 2010



Tanto para as irradiações solares extraterrestre e global quanto para os valores das superfícies horizontal e vertical, as curvas apresentaram comportamento periódico, acompanhando as variações astronômicas do Sol. Para superfície horizontal, maiores valores ocorrendo no verão e menores valores no inverno, enquanto que para superfície vertical, simulando uma latitude do hemisfério norte, maiores valores ocorrendo no inverno e menores no verão.

Para as irradiações solares global, a dispersão dos valores é maior em função da interferência da atmosfera, com seus gases, aerossóis, vapor d'água e nuvens, que são fatores que causam a atenuação dos níveis de irradiação solar na superfície terrestre, promovendo maior variabilidade [8-9]. A Tabela 3 mostra os valores médios mensais e desvio padrão das irradiações solares extraterrestre e global em superfície horizontal e vertical orientada para o Norte em Botucatu-SP no ano de 2010.

Tabela 3 - Valores médios mensais em MJ/m² e desvio padrão (DP) da irradiação solar Extraterrestre e Global na horizontal e vertical orientada para o Norte para Botucatu no ano de 2010

Mês	H₀ Média (± DP)	H_{0β} Média (± DP)	H_{GH} Média (± DP)	H_{GV} Média (± DP)
Jan	42,22 (0,31)	0,62 (0,49)	14,9 1 (4,62)	5,45 (1,06)
Fev	40,32 (0,77)	4,47 (1,73)	19,02 (5,83)	6,74 (1,47)
Mar	36,62 (1,45)	13,14 (3,36)	16,90 (4,07)	9,06 (2,04)
Abr	31,74 (1,33)	23,10 (2,29)	14,52 (4,71)	11,53 (4,51)
Mai	26,47 (1,16)	30,62 (1,35)	12,46 (2,83)	13,41 (4,20)
Jun	24,16 (0,21)	33,12 (0,20)	12,06 (1,89)	15,90 (3,84)
Jul	25,35 (0,85)	31,89 (0,91)	11,34 (3,66)	13,37 (5,36)
Ago	29,72 (1,56)	26,29 (2,33)	15,83 (2,22)	14,69 (2,16)
Set	35,11 (1,51)	16,45 (3,31)	14,76 (5,56)	9,46 (4,06)
Out	39,51 (1,04)	6,33 (2,40)	12,10 (9,70)	5,37 (2,70)
Nov	42,03 (0,44)	0,96 (0,77)	19,06 (5,10)	5,67 (0,92)
Dez	42,84 (0,06)	0,01 (0,00)	18,48 (5,89)	5,12 (0,84)

Para a irradiação solar extraterrestre, o maior valor para superfície horizontal (42,84 MJ/m²) e o menor valor para superfície vertical (0,01 MJ/m²) ocorreram para o mês de dezembro. Para o mês de junho, os valores foram inversos: menor valor para superfície horizontal (24,16 MJ/m²) e maior valor para superfície vertical (33,12 MJ/m²). Os desvio-padrão foram baixos visto que os valores são estimados e a variação deve-se apenas às variações astronômicas dentro do mês. Sendo assim, os desvio-padrão da superfície vertical foram maiores que os da superfície horizontal, principalmente nos meses de transição entre as estações verão e inverno.

Para a irradiação solar global, os maiores valores para superfície horizontal ocorreram no mês de novembro (19,06 MJ/m²) e para superfície vertical em junho (15,90 MJ/m²). Já os menores valores, para superfície horizontal, ocorreram em julho (11,34 MJ/m²) e, para superfície vertical, em dezembro (5,12 MJ/m²). Tanto para superfície horizontal quanto para vertical, os desvio-padrão são mais elevados em função da complexidade dos processos físicos de atenuação da atmosfera, promovendo a grande variabilidade nos valores medidos.

1.3.2 EVOLUÇÃO DIURNA DAS MEDIDAS DA IRRADIAÇÃO SOLAR EM SUPERFÍCIE VERTICAL E HORIZONTAL

A seguir, são apresentados gráficos das evoluções diurnas das medidas da irradiação solar global em superfície horizontal e vertical ao Norte. A figura 7-A apresenta a evolução diurna da irradiação global horizontal e vertical no dia 14 de janeiro de 2010, um dia de verão com céu nublado. A variação das irradiações global horizontal e vertical apresentam comportamento semelhante. Os valores de máximo se encontram às 13:00, sendo de 1,48 MJ/m² para a superfície horizontal e de 0,66 MJ/m² para a superfície vertical.

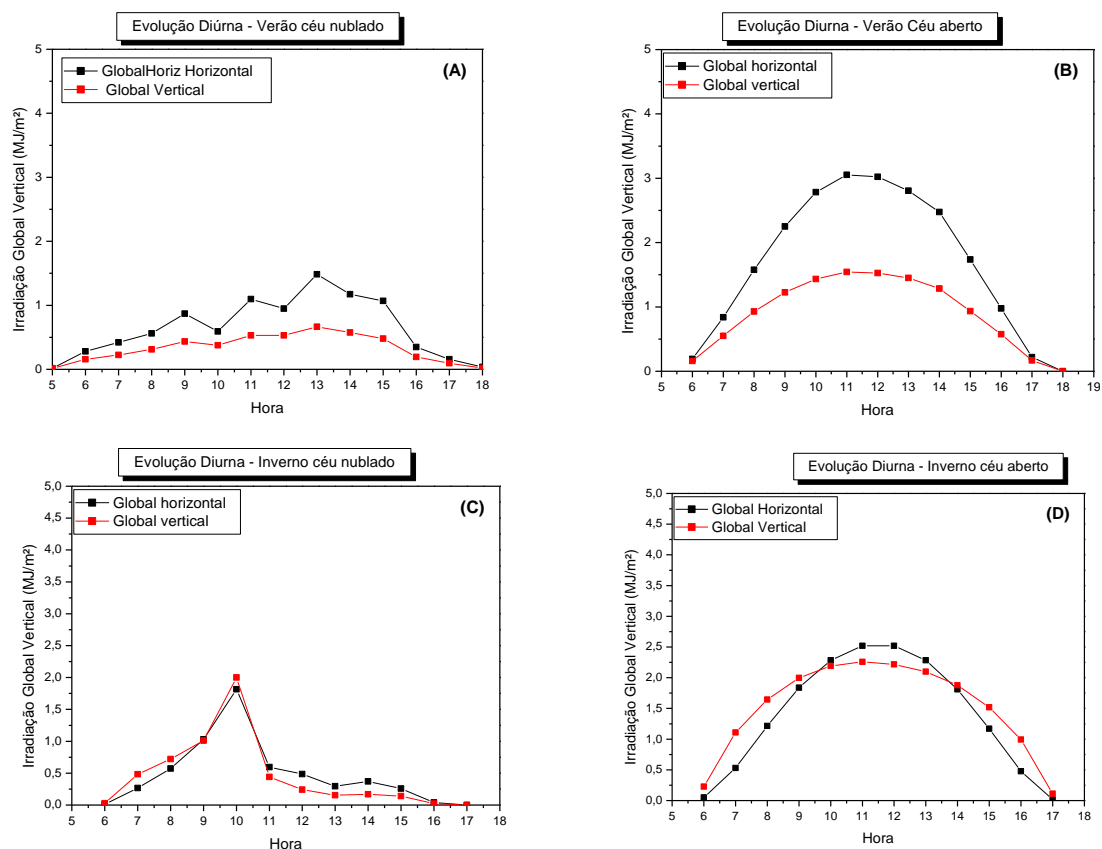
A figura 7-B apresenta a evolução diurna para as irradiações global horizontal e vertical para o dia 18 de março, um dia de verão com céu aberto. A incidência de irradiação solar global em superfície horizontal é maior que em superfície vertical. O valor de máximo para a superfície horizontal e vertical foi às 11 horas, com 3,05MJ/m² para superfície horizontal e de 1,54 MJ/m² para superfície vertical.

A figura 7-C apresenta a evolução diurna em um dia de inverno com céu nublado. O dia escolhido foi 22 de junho. Neste dia, o comportamento para ambas superfícies é similar. Os valores de máximo de 1,81 MJ/m² para superfície horizontal e de 2,00 MJ/m² para vertical, às 10:00.

A figura 7-D apresenta a variação diurna para o dia 7 de agosto, dia de céu aberto no inverno. Os valores de máximo para cada superfície se encontram às 11:00, sendo de 2,52 MJ/m² para superfície horizontal e de 2,25 MJ/m² para superfície vertical.

Nesta breve análise da evolução diária, mostrou que durante o período de inverno, que é um período seco para o clima local, os níveis de radiação solar em superfície vertical durante a manhã (entre às 6:00 e 9:00) e no final do dia (entre às 14:00 17:00) são maiores que em superfície horizontal. O que sugere recomendações para a continuidade dos estudos nesta área, visando analisar os dados das evoluções diurnas da radiação solar global em superfície vertical ao longo do ano, afim de se obter maiores conhecimentos do comportamento da radiação solar global em superfície vertical horária para a região.

Figura 7 - Evolução diurna das irradiações global horizontal e vertical para dias de verão e de inverno com céu nublado e céu aberto



1.4 CONCLUSÃO

A partir desse estudo, obtivemos as seguintes conclusões:

- ✓ Para a irradiação solar extraterrestre, comparando os resultados entre horizontal e vertical, observa-se uma coincidência entre valores mínimos de uma superfície com o valor máximo da outra;
- ✓ Para a irradiação solar extraterrestre e global vertical, os valores máximos são observados nos meses de inverno, e os valores de mínimo são encontrados nos meses de verão, devido à latitude simulada do hemisfério norte;
- ✓ Para o aproveitamento da irradiação solar durante o ano, entre os meses de maio à 11 de agosto, a melhor inclinação da superfície é na vertical, enquanto

que para o restante dos meses do ano, a melhor inclinação da superfície é a horizontal;

- ✓ Nos meses de verão, a irradiação medida na superfície vertical é composta basicamente das parcelas difusa e refletida;
- ✓ Como recomendações para a continuidade de estudo, sugere-se analisar os dados das evoluções diurnas da radiação solar global em superfície vertical ao longo do ano, afim de se obter maiores conhecimentos do comportamento da radiação solar global em superfície vertical horária para a região.

REFERÊNCIAS

[1] Varejão silva, M.A. Meteorologia e Climatologia. Recife: Versão Digital, 2006.

[2] M. Iqbal, An Introduction to Solar Radiation, Academic Press. New York: Academic Press; 1983.

[3] Codato G, Oliveira A, Soares J, Escobedo J, Gomes E, Pai A. Global and diffuse solar irradiances in urban and rural areas in southeast Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*. 2007;93(1-2):57-73.

[4] Teramoto, E. T.; Escobedo, J. F. Análise da frequência anual das condições de céu em Botucatu, São Paulo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola E Ambiental*. 2012;16(9):985-992.

[5] Chaiyapinunt S, Ruttanasupa P, Ariyapoonpong V, Duanmeesook K. A shadow-ring device for measuring diffuse solar radiation on a vertical surface in a tropical zone. *Solar Energy*. 2016;136:629-638.

[6] Raptis P, Kazadzis S, Psiloglou B, Kouremeti N, Kosmopoulos P, Kazantzidis A. Measurements and model simulations of solar radiation at tilted planes, towards the maximization of energy capture. *Energy*. 2017;130:570-580.

[7] Turner J, Parisi A, Turnbull D. Reflected solar radiation from horizontal, vertical and inclined surfaces: Ultraviolet and visible spectral and broadband behaviour due

to solar zenith angle, orientation and surface type. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*. 2008;92(1):29-37.

[8] Kovadlo P, Shikhovtsev A, Lukin V, Kochugova E. Solar activity variations inducing effects of light scattering and refraction in the Earth's atmosphere. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2018.

[9] .Dal Pai, A.; Dall'antonia Junior, L. C.; Rodrigues, D.; Escobedo, J. F. Análise da atenuação das radiações solares global, direta horizontal e difusa horária em função da massa ótica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 3., 2010, Belém. Anais. Belém, PA: ABENS, 2010. 1 CD-ROM.

CAPITULO 2: MODELOS DE ESTIMATIVA DA IRRADIAÇÃO SOLAR GLOBAL EM SUPERFÍCIE VERTICAL

Camila Piacitelli Tieghi – camilapiacitelli@yahoo.com.br

Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - Faculdade de Ciências Agrônomicas de Botucatu, Departamento de Bioprocessos e Biotecnologia

Alexandre Dal Pai – adalpai@fca.unesp.br

Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - Faculdade de Ciências Agrônomicas de Botucatu, Departamento de Bioprocessos e Biotecnologia

2.1 INTRODUÇÃO

O conhecimento da irradiação solar em plano vertical é importante em diversas áreas, visando o conforto térmico ou para fazer o uso da energia solar para conversão energética ou térmica. Na zootecnia, o conhecimento da incidência solar nas fachadas das construções de galpões avícolas é necessário para aumentar o conforto térmico dos animais [1-2]. Na arquitetura, os dados de radiação solar são importantes para projetar edifícios com eficiência energética, onde eles são normalmente usados em aplicações como o cálculo de ganhos de calor solar ou cargas de resfriamento. Os níveis de radiação solar nas fachadas influem na forma da edificação, orientação das aberturas, dimensão e posicionamento das paredes, proteções solares nas aberturas e materiais utilizados em paredes [3 – 4]. Na agronomia, o conhecimento dos níveis de irradiação solar incidentes nas fachadas de estufas solares são de suma importância para equilibrar a temperatura interna nos meses de verão e inverno e visando também a economia de uso do combustível fóssil ou de qualquer outro sistema de aquecimento usado para aquecer a estufa durante o inverno [5-6]. Na engenharia elétrica, o potencial solar das fachadas dos prédios é estudado para fixar painéis fotovoltaicos, pois as fachadas contribuem significativamente para o potencial solar total dos prédios [7 – 8].

A irradiação solar global em superfície vertical é composta de três porções. A porção direta, proveniente do disco solar quando este está total ou parcialmente visível. A porção difusa, produzida a partir da ação de espalhamento causado na atmosfera local, sofrendo um ou mais desvios até incidir sobre um local. E por último, a porção refletida, proveniente da reflexão dos raios solares sobre albedo da superfície. O albedo varia de acordo com seus componentes físicos (cor, rugosidade, etc.) e do ângulo zenital [9].

Estações meteorológicas comumente medem a irradiação solar global em superfícies horizontais. No entanto, a medida da irradiação global no plano vertical é escassa devido à entraves financeiros, de instrumentação e de operação.

Para conhecer os níveis de irradiação solar global em plano inclinado em determinado local, quando não é possível obter suas medidas, os modelos de estimativa da irradiação solar auxiliam nessa tarefa. Vários autores propuseram modelos que estimam a irradiação solar em plano inclinado com base nas medidas da irradiação solar na horizontal, por ser um dado medido em estações meteorológicas corriqueiramente [10-14].

Para estimar a irradiação solar, existem três tipos de modelagem. Os modelos paramétricos, de redes neurais e os estatísticos. Os modelos paramétricos necessitam de várias informações das condições atmosféricas locais dependendo da componente da radiação solar a ser estimada ou então a utilização de percentuais fixos de ocorrência de cada componente da radiação solar global [15]. Com a modelagem realizada por meio de rede neural artificial (RNA) é possível realizar as previsões e avaliações a partir de dados meteorológicos disponíveis, tais como a temperatura ambiente, irradiação solar, umidade do solo, sensação térmica, umidade do ar, orvalho, precipitação [16]. Por fim, os modelos estatísticos necessitam de dados medidos para serem comparados com os valores estimados. Os modelos estatísticos são equações matemáticas ajustadas por meio de regressão linear ou polinomial em correlações com as frações radiométricas ou com a razão de insolação [17]. Dentre tantos modelos para estimar a irradiação solar, poucos foram testados para estimar a irradiação solar em plano vertical.

Os modelos da literatura que foram testados para estimar a irradiação solar em plano inclinado são para superfícies inclinadas para o Equador. No hemisfério Sul, orientado ao Norte e no hemisfério Norte, orientado ao Sul. Isto se dá pelo fato de que quando se inclina uma superfície para o Equador, simula-se uma superfície horizontal em latitude maior, no caso de locais no hemisférios Sul, visando maximizar o ganho energético da irradiação solar, principalmente nos meses de inverno. Devido à declinação solar, nos meses de inverno para o hemisfério Sul, o Sol ilumina a região Norte do planeta.

Para aumentar a precisão da estimativa da irradiação solar, pode-se combinar modelos de séries temporais e espaciais. Enquanto os modelos de séries temporais estimam a irradiação solar apenas para um local, os modelos espaciais podem

estimar a irradiação solar para muitos locais. Um complementa o outro, pois, para modelos de séries temporais se tem muitos anos de dados enquanto para modelagem espacial não se tem muitos anos de dados.

Modelos de séries temporais são conjuntos de observações ordenadas no tempo, que podem ser contínuas, quando observações são feitas continuamente no tempo, ou discretas, quando as medidas são tomadas em intervalos de tempo regularmente espaçados [18]. Modelos espaciais, que são modelos de estimativa por satélites geoestacionários, são uma importante fonte de informação, dadas a frequência elevada, a resolução espacial das estimativas, e o número de anos atualmente disponível. São simples de manipular, e ainda permitem resgatar detalhes para estudos climatológicos do comportamento da radiação solar [19].

O trabalho tem os seguintes objetivos:

- a) Testar modelos clássicos da literatura para a estimativa da irradiação global desenvolvidos em superfícies inclinadas com dados da estação de radiometria de Botucatu-SP medidos em superfície vertical.
- b) Propor um modelo de estimativa da irradiação solar global para superfície vertical para Botucatu-SP.

2.2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.2.1 LOCAL E CLIMA

O estudo é baseado em medidas da irradiação global em planos horizontal e vertical orientado ao Norte geográfico estação de radiometria do Departamento de Engenharia Rural da Faculdade de Ciências Agrônomicas da UNESP de Botucatu (latitude 22° 54' S, longitude 48° 27' O e altitude 716 m). Foram utilizados os dados medidos no ano de 2010. A cidade de Botucatu tem cerca de 130.000 habitantes e é rodeada por uma formação de relevo assimétrico denominada Cuesta de Botucatu e pelas bacias hidrográficas do Tietê e do Paranapanema. De acordo com a classificação climática de Köppen, o clima local é o Cwa (clima subtropical úmido), com verão quente, úmido e chuvoso e inverno seco e de temperaturas amenas. Os valores de temperatura e umidade relativa seguem as variações astronômicas, com valores máximos de temperatura e umidade relativa em fevereiro (23,12 °C e 78,25% respectivamente) e valores mínimos de temperatura em julho (17,10 °C) e umidade

relativa em agosto (63,97%). A estação chuvosa ocorre no verão e primavera, acompanhada de elevada nebulosidade. Cerca de 80% da precipitação anual ocorre nesse período, com máxima no mês de janeiro (246,2 mm). Nas estações do inverno e outono, a precipitação média é inferior a 100 mm mensais, com mínima em agosto (36,1 mm) [20].

2.2.2 INSTRUMENTAÇÃO E CONTROLE DE QUALIDADE

Os valores das irradiâncias solares foram monitorados por um sistema de aquisição de dados automático modelo Datalogger 23X da empresa Campbell Scientific Inc com frequência de varredura de 0,2Hz, armazenando médias de 5 minutos no formato W/m² no período de janeiro à dezembro de 2010.

A irradiância solar global no plano horizontal foi medida com piranômetro Eppley-PSP. A irradiância solar global no plano vertical foi medida com piranômetro Kipp-Zonen – CM3. Para medir a irradiância global na superfície vertical, o piranômetro foi posicionado sobre plano inclinado à 90° com a face voltada para o Norte.

Foi realizada uma filtragem dos dados, dos quais foram utilizados no total 338 dias, que equivalem a 92,6% do total de um ano. As irradiâncias global (H_g^d), direta (H_{bh}^d) e difusa (H_d^d) em superfície horizontal e irradiância global em superfície vertical foram integradas em partições diárias de tempo, do nascer ao pôr do Sol, em MJ/m². A irradiação solar extraterrestre em superfície horizontal (H_0^d) foi calculada segundo Iqbal (1983) [21].

2.2.3 MODELAGEM

A irradiação solar global diária ($H_{\beta T}^d$) incidente em determinada superfície inclinada a um ângulo β em relação ao plano horizontal é estimada pela soma das três frações da irradiação solar global, que são a irradiação direta ($H_{\beta b}^d$), irradiação difusa ($H_{\beta d}^d$) e a irradiação refletida ($H_{\beta r}^d$) [9] conforme equação 1.:

$$H_{\beta T}^d = H_{\beta b}^d + H_{\beta d}^d + H_{\beta r}^d \quad (1)$$

Os modelos de estimativa testados no trabalho foram: modelo Geométrico [21], Liu & Jordan (1963), Temps & Coulson (1977), Perez (1987), Klein (1976) e Hay (1979), apresentando diferenças em suas formulações em função de parâmetros atmosféricos e condições atmosféricas distintas. Todos esses modelos foram parametrizados para estimar a porção difusa, sendo as porções direta e refletida as mesmas para todos os modelos.

A fração da irradiação direta ($H_{\beta b}^d$) incidente em superfícies inclinadas [21] é calculada através da correção da irradiação direta projetada na horizontal (H_{bh}^d), por meio do fator de correção geométrico R_B , conforme a equação 2:

$$H_{\beta b}^d = H_{bh}^d R_B \quad (2)$$

A fração da irradiação solar refletida ($H_{\beta r}^d$) incidente em uma superfície inclinada, considerando que a reflexão pela superfície do solo seja isotrópica, é calculada pela equação 3, a seguir:

$$H_{\beta r}^d = H_g^d \rho \frac{1}{2} (1 - \cos(\beta)) \quad (3)$$

Onde, ρ 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 horizontal, β é o ângulo de inclinação e o termo $[\frac{1}{2}(1 - \cos(\beta))]$ é a razão entre a irradiação incidente na superfície inclinada sobre a irradiação refletida pelo solo.

Já para a fração difusa ($H_{\beta d}^d$), a tabela 1 traz as equações para cada um dos modelos de estimativa.

Tabela 1 - Modelos de estimativa da irradiação solar difusa em superfície inclinada

Autores	Local	Modelo	Isotropia
Geométrico		$H_{\beta d}^d = H_d^d R_B$	Não considera
Liu & Jordan (1963)	Massachusetts (EUA)	$H_{\beta d}^d = H_d^d \frac{1}{2} (1 + \cos(\beta))$	Isotrópico
Temps & Coulson (1977)	Califórnia (EUA)	$H_{\beta d}^d = H_d^d (1 + \cos(\beta)) \left[1 + \text{sen}^3 \left(\frac{\beta}{2} \right) \right] [1 + \cos^2(\theta_\beta) \text{sen}^3(\theta_z)]$	Anisotrópico
Hay (1979)	Vancouver (Canada)	$H_{\beta d}^d = I_c + I_{SI} = H_d^d [A_I R_B + \frac{1}{2} (1 + \cos(\beta)) (1 - A_I)]$	Anisotrópico
Klucher (1979)	Cleveland (EUA)	$H_{\beta d}^d = H_d^d (1 + \cos(\beta)) \left[1 + \text{sen}^3 \left(\frac{\beta}{2} \right) \right] [1 + F \cos^2(\theta_\beta) \text{sen}^3(\theta_z)]$	Anisotrópico
Perez (1987)	Albany, NY (EUA)	$H_{\beta d}^d = H_d^d \frac{1}{2} (1 + \cos(\beta)) (1 - F_1) + F_1 R_B + F_2 \text{sen}(\beta)$	Anisotrópico

Símbolos:

$H_{\beta d}^d$: Irradiação solar difusa em plano inclinado (MJ/m²)

H_d^d : Irradiação difusa incidente na superfície horizontal (MJ/m²)

R_B : Fator de correção da incidência dos raios solares

β : Ângulo de inclinação da superfície (graus)

θ_β : Ângulo de incidência (graus)

θ_z : Ângulo Zenital (graus)

I_c : Irradiação difusa circunsolar (MJ/m²)

I_{SI} : Irradiação difusa isotrópica (MJ/m²)

A_I : Índice anisotrópico $A_I = \left(\frac{H_{\beta d}^d}{H_0^d} \right)$

F : Função modeladola [$F = 1 - (H_d^d / H_g^d)^2$]

F_1 : Irradiação difusa circunsolar (MJ/m²) $F_1 = F_{11} + F_{12}\Delta + F_{13}\theta_z$

F_2 : Irradiação difusa horizontal (MJ/m²) $F_2 = F_{21} + F_{22}\Delta + F_{23}\theta_z$

No modelo de Perez et al. (1986) [12] é necessário realizar cálculos para se obter valores que serão utilizados nas equações da irradiação difusa circunsolar (F_1)

e irradiação difusa horizontal (F_2), os quais estão apresentados nas equações 4, 5 e 6 e tabelas 2 e 3, a seguir:

$$\Delta = m_r H_d^d / H_0^d \quad (4)$$

$$m_r = \frac{1}{[\cos \theta_z + 0,15(93,885 - \theta_z)]^{-1,253}} \quad (5)$$

$$e = (H_d^d + H_b^d) / H_d^d \quad (6)$$

Onde: H_b^d : Irradiação direta na horizontal; H_0^d : Irradiação solar extraterrestre em superfície horizontal; Δ : Índice atmosférico; m_r : Massa ótica do ar; e : Índice de turbidez de céu; θ_z : Ângulo zenital (em radianos).

Tabela 2 - Intervalos de e para cada categoria de turbidez de céu

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	$5,980 < e \leq 10,080$
8	$> 10,080$

Tabela 3 - Coeficientes F_1 e F_2 para cada categoria de e , compilados de Perez et al. (1987)

Categorias de 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

2.2.4 INDICATIVOS ESTATÍSTICOS

O desempenho dos modelos de estimativa da irradiação solar em plano vertical foi verificado por meio dos indicadores estatísticos MBE (Mean Bias Error), RMSE (Root Mean Square Error) [22].

$$MBE = \left(\frac{\sum_i^N (y_i - x_i)}{N} \right) \quad (7)$$

$$MBE (\%) = 100 \frac{(\sum_i^N (y_i - x_i) / N)}{\bar{x}} \quad (8)$$

$$RMSE = \left(\frac{\sum_i^N (y_i - x_i)^2}{N} \right)^{1/2} \quad (9)$$

$$RMSE (\%) = 100 \frac{\left(\frac{\sum_i^N (y_i - x_i)^2}{N} \right)^{1/2}}{\bar{x}} \quad (10)$$

Onde y_i são os valores estimados, x_i são os valores medidos, N são o número de observações e \bar{x} é o valor médio medido.

O indicativo MBE (Mean Bias Error) mostra o desvio das médias e fornece indicativos quanto o desempenho do modelo a longo prazo. Resultados positivos de MBE indicam que o modelo superestima os valores medidos e resultados negativos de MBE indicam que o modelo subestima os valores medidos. Quanto menor o valor absoluto de MBE, melhor o desempenho do modelo testado [22]. A desvantagem deste indicativo é que uma superestimativa cancela uma subestimativa.

O RMSE (Root Mean Square Error) é a raiz quadrada do erro quadrático médio e informa quanto ao desempenho do modelo à curto prazo. Quanto menor seu valor, menor a dispersão dos dados em torno do modelo e melhor é a performance dos modelos. As desvantagens do RMSE são que alguns erros de grande proporção na soma podem causar acréscimos significativos nos valores de RMSE, e ele não diferencia superestimativa de subestimativa.

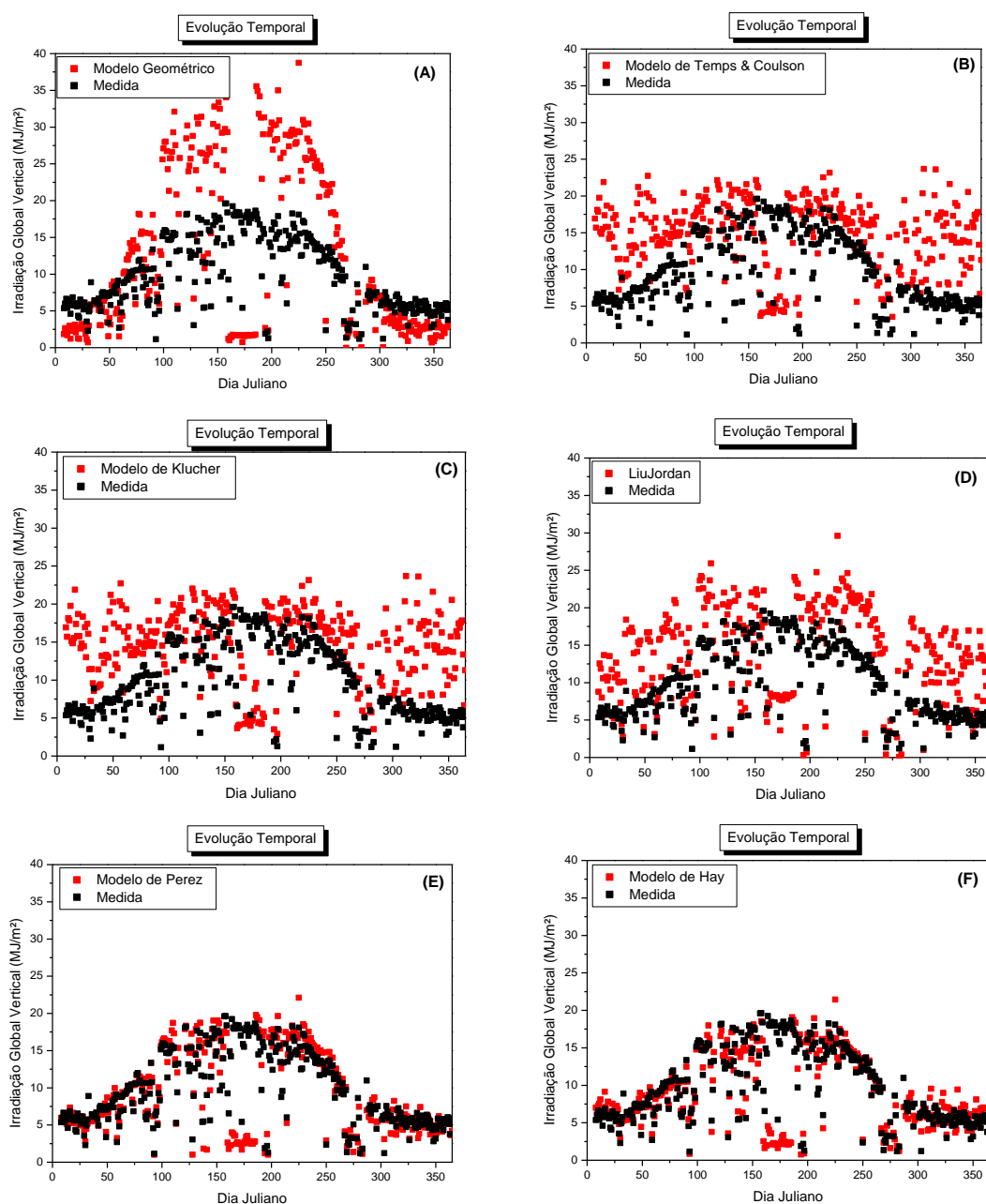
A realização de todos os cálculos e indicativos estatísticos foram através do *software Origin*.

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.3.1 ANÁLISE DOS MODELOS DA LITERATURA

Os desempenhos dos modelos testados da literatura para a estimativa da irradiação global desenvolvidos em superfícies inclinadas foram comparados com os dados medidos da irradiação solar em superfície vertical ao Norte. A figura 1 apresenta os gráficos da variação temporal dos valores estimados e medidos para cada modelo avaliado da literatura.

Figura 1 - Variação temporal dos valores estimados e medidos para cada modelo avaliado da literatura



Os resultados obtidos com o modelo Geométrico estão mostrados na Figura 1-A. O modelo Geométrico apresentou o pior desempenho na estimativa da irradiação solar em plano vertical nos meses de inverno, período em que a irradiação difusa é, em geral, anisotrópica, que não é levada em consideração pelo modelo. O modelo superestimou a irradiação global inclinada nos meses de inverno e subestimou nos meses de verão. Este modelo não considera as condições de céu, nem a porção da irradiação refletida, apenas utiliza o fator de correção geométrica de incidência dos

raios solares na superfície inclinada (R_B), o que justifica tal dispersão entre valores estimados e medidos.

Os resultados obtidos com o modelo de Temps & Coulson (1977) estão mostrados na Figura 1-B. O modelo superestimou as medidas da irradiação global em superfície vertical ao longo do ano. Os valores que se aproximaram aos medidos foram durante o inverno, o que é esperado para este modelo, onde o termo $[1 + \text{sen}^3(\beta / 2)]$ auxilia razoavelmente bem para o brilho horizontal verificado em condições de céu claro, em que a irradiação difusa próxima ao horizonte é mais alta do que no zênite do Sol (brilho horizontal).

A figura 1-C ilustra os resultados obtidos com o modelo de Klucher (1979) para estimar a irradiação solar global que incidente em um sensor em uma superfície inclinada. No modelo de anisotrópico de Klucher (1979) observa-se, de modo geral, que o modelo superestima os níveis de irradiação solar global em todas as condições de céu, mudando de céu aberto à nublado, contudo, durante o inverno se aproximou dos valores medidos da irradiação global em superfície vertical, período em que a porção da irradiação solar difusa é predominantemente anisotrópica, com predomínio de dias de céu aberto. A função modeladora $[F = 1 - (H_d^d/H_g^d)^2]$ obteve melhores resultados em condições de céu claro, quando a razão da irradiação difusa pela global é pequena, onde F tende a 1, o modelo aproxima-se do de Temps & Coulson.

Os resultados obtidos com o modelo de Liu & Jordan (1973) estão mostrados na Figura 1-D. O modelo de Liu & Jordan (1973), que é um modelo isotrópico, assume que a intensidade da irradiação seja uniforme em todo hemisfério celeste para estimar a porção da irradiação difusa. O modelo superestimou as medidas durante o ano todo. Contudo, no mês de julho, subestimou as medidas da irradiação global em superfície vertical.

A figura 1-E ilustra resultados da aplicação do modelo de Perez et al. (1987) para estimar a irradiação global incidente em uma superfície inclinada. Este modelo se ajustou bem às medidas da irradiação global em superfície vertical, o qual inclui as subcomponentes da irradiação difusa, isotrópica, brilho horizontal e circunsolar. A variação temporal acompanhou as medidas da irradiação solar global em superfície vertical tanto nos dias de céu nublado, quando as medidas apresentaram baixos níveis de irradiação global, até 10MJ/m², quanto para os dias de céu aberto, quando a irradiação global chega até 20 MJ/m².

A figura 1-F mostra a variação anual dos valores estimados da irradiação solar global na superfície inclinada, obtidos com o modelo de Hay (1979), que considera a irradiação difusa composta das subcomponentes circunsolar vinda diretamente do disco solar e a isotropicamente distribuída vinda do resto do hemisfério celeste. No período de verão, quando a irradiação difusa é predominantemente isotrópica, o modelo superestimou em torno de 3 MJ/m² à mais que os valores medidos da irradiação global em superfície vertical. De maneira geral, este modelo apresentou bons resultados na estimativa da irradiação solar global em superfície vertical, comparado aos valores medidos.

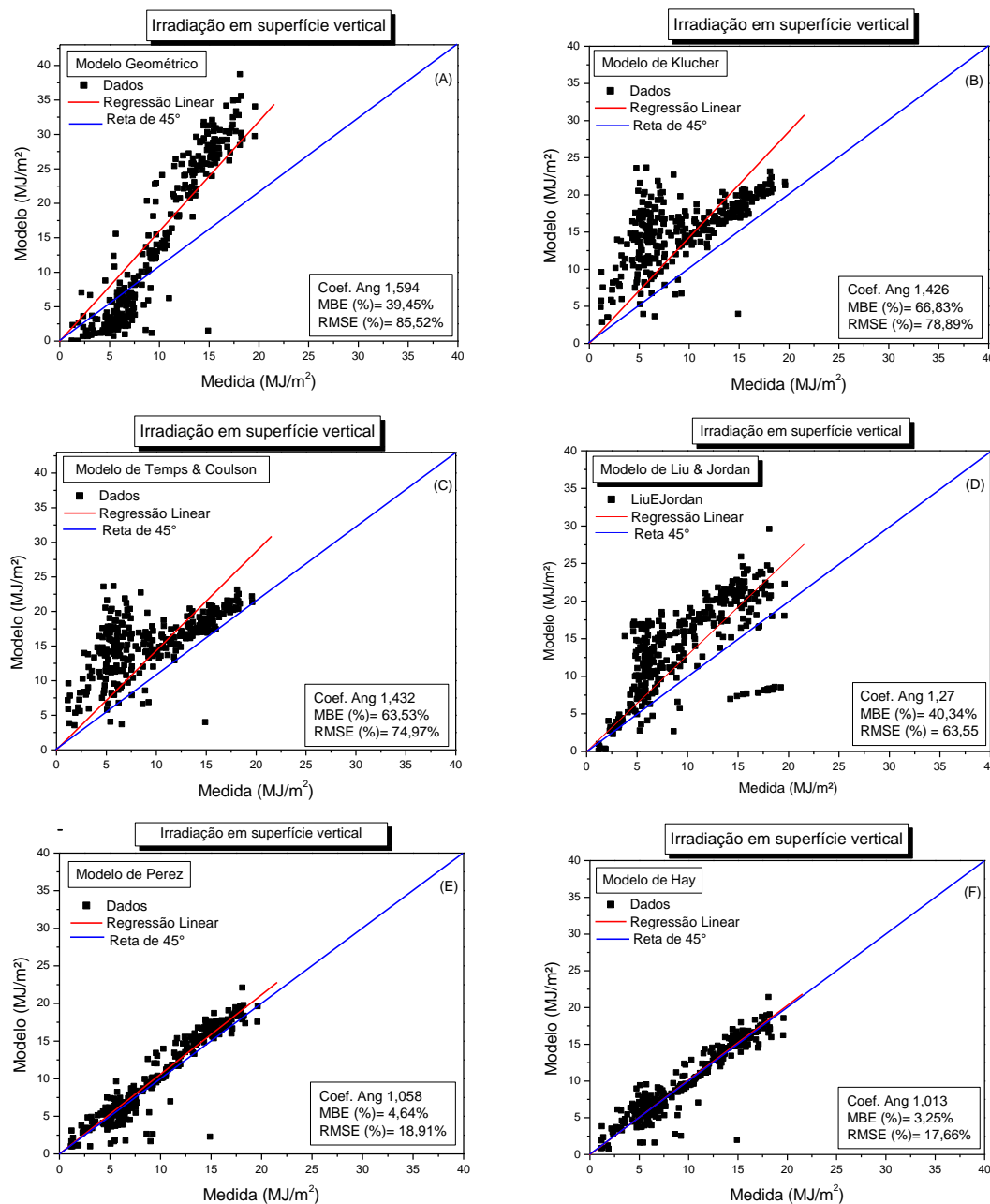
Visualmente, os modelos Geométrico, Klucher (1979), Temps & Coulson (1977) e Liu & Jordan (1963), apresentaram os piores desempenhos para as condições atmosféricas local enquanto os modelos de Perez et al. (1987) e de Hay (1979) obtiveram os melhores desempenhos. Para quantificar esse desempenho à título de comparação, foram calculados os indicativos estatísticos MBE (MJ/m²), MBE(%), RMSE (MJ/m²), RMSE (%) e coeficiente angular obtidos na validação das equações de estimativa diária apresentados na Tabela 4. O melhor desempenho de estimativa foi para o modelo de Hay, o qual forneceu menores valores nos indicativos estatísticos, MBE (%) de 3,25%, RMSE (%) de 17,66% e coeficiente angular de 1,01. Os piores desempenhos foram para os modelos de Klucher, Temps & Clouson, Liu & Jordan e Geométrico, onde os indicativos estatísticos mostraram que os modelos superestimaram os valores medidos, provavelmente porque esses modelos ou não contemplam a radiação refletida ou não contemplam os efeitos anisotrópicos da radiação solar na fase de modelagem.

Tabela 4 - Indicativos estatísticos de desempenho dos modelos da literatura testados em comparação com valores medidos

Modelo	MBE (MJ/m²)	MBE (%)	RMSE (MJ/m²)	RMSE (%)	Coefficiente angular
Geométrico	3,58	39,45	7,78	85,52	1,59
Klucher (1979)	6,08	66,83	7,17	78,89	1,42
Temps & Coulson (1977)	5,96	63,53	7,04	74,97	1,43
Liu & Jordan (1963)	4,00	40,34	6,31	63,55	1,27
Perez (1987)	0,42	4,64	1,72	18,91	1,05
Hay (1979)	0,29	3,25	1,60	17,66	1,01

Para verificar o grau de ajustamento dos valores estimados à medida, foram construídos gráficos plotando o valor estimado no eixo Y e o valor medido no eixo X, sendo que os melhores desempenhos sejam alcançados para pontos coincidentes à reta ideal (45°). Nesse sentido, a figura 2 mostra a distribuição da irradiação solar global diária em plano vertical estimada através dos modelos da literatura testados em função dos valores medidos da irradiação solar global em superfície vertical.

Figura 2 - Distribuição da irradiação solar global diária no plano vertical estimada através dos modelos Geométrico (A), Klucher (B), Temps & Coulson (C), Liu & Jordan (D), Perez (E) e Hay (F), em função dos valores medidos da irradiação solar global em superfície vertical



A figura 2-A mostra a validação do modelo Geométrico em função dos dados observados da irradiação global em superfície vertical. Este modelo não se mostrou adequado, pois não considera o efeito da anisotropia da irradiação, fato que gerou grande espelhamento dos pontos (RMSE= 85,52%) e superestimou os valores medidos, apresentando o indicativo MBE de 39,45% e e coeficiente angular de 1,59.

A figura 2-B mostra a validação do modelo anisotrópico de Klucher em função dos dados observados. Este modelo superestimou os dados observados, apresentando valores de MBE= 66,83%. O modelo também apresentou grande espalhamento dos pontos, gerando alto percentual do indicativo de dispersão (RMSE= 78,89%) e coeficiente angular de 1,42.

O modelo de Temps & Coulson apresentou os seguintes resultados nos indicativos estatísticos de desempenho: MBE= 63,53%, RMSE=74,97% e coeficiente angular de 1,43. O modelo superestimou os medidos, apresentou grande espalhamento e apresentou maior valor de coeficiente angular comparado com os outros modelos testados. Seu desempenho é mostrado na figura 2-C.

A figura 2-D apresenta a validação do modelo isotrópico de Liu & Jordan em função das medidas da irradiação global vertical. Este modelo apresentou altos valores nos indicativos estatísticos MBE e RMSE. O modelo superestimou os valores medidos, resultando em MBE= 40,34%. O indicativo de espalhamento foi alto, sendo RMSE= 63,55%, e coeficiente angular de 1,27.

O desempenho da validação do modelo anisotrópico de Perez é mostrado na figura 2-E. Comparado com os modelos anteriores, o modelo apresentou bom desempenho, com baixos valores de espalhamento e superestimativa. Os valores dos indicativos estatísticos são de MBE= 4,64%, RMSE= 18,91% e coeficiente angular de 1,05.

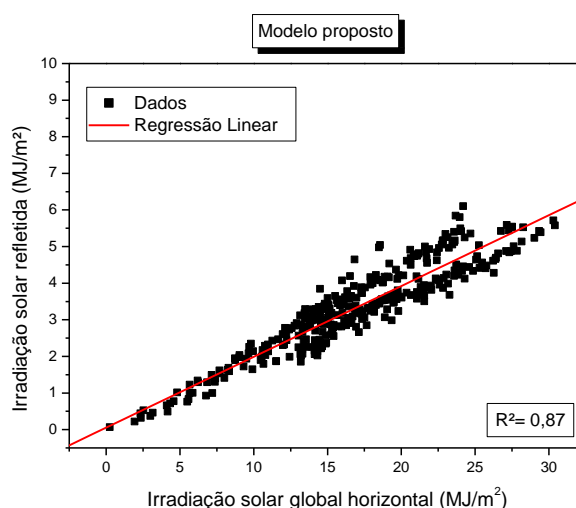
O modelo que apresentou o melhor desempenho foi o de Hay, o qual apresentou menores valores absolutos para todos os indicativos estatísticos, comparado com os outros modelos testados. Sendo MBE (%)= 3,25%, RMSE (%)= 17,66% e coeficiente angular de 1,01. A validação do modelo de Hay é mostrada na figura 2-F.

2.3.2 MODELO PROPOSTO

A radiação global em superfície vertical é composta pelas parcelas direta, difusa e refletida, todas projetadas em superfície vertical, conforme já descrito na equação 1. Dessa forma, o modelo para a estimativa da radiação global em superfície inclinada foi desenvolvido em duas etapas. Na primeira etapa, as radiações direta e difusa em superfície horizontal foram projetadas para superfície vertical por meio da

multiplicação do fator R_b , se assemelhando ao modelo Geométrico. Na segunda etapa, a radiação refletida foi modelada por meio de regressão linear em função da radiação global horizontal. A modelagem utilizou 75% dos dados e a validação os 25% restantes. A figura 3 mostra a correlação entre os dados de radiação refletida em função da radiação global horizontal com elevado coeficiente de determinação ($R^2=0,87$), enquanto que a equação 11 já mostra o modelo com as três parcelas (direta, difusa e refletida) já incorporadas.

Figura 3 - Correlação entre os dados de radiação refletida em função da radiação global horizontal



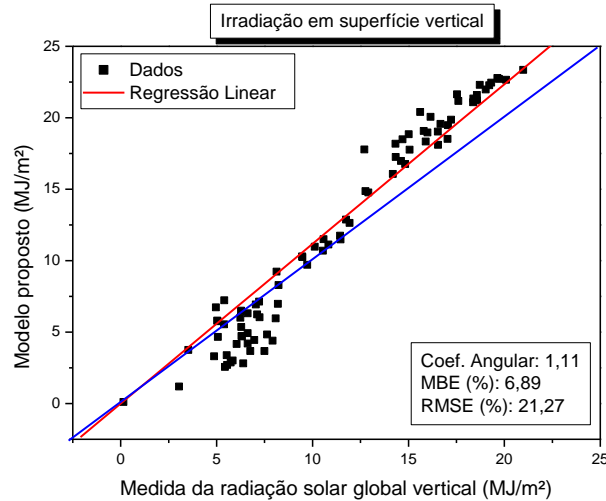
$$H_{\beta T}^d = H_g^d R_B + 0,194 H_g^d + 0,0531 \quad (11)$$

O desempenho do modelo proposto de estimativa da irradiação solar em plano vertical foi realizado por meio dos indicadores estatísticos MBE, RMSE e coeficiente angular. A tabela 5 e a figura 4 mostram a validação do modelo proposto.

Tabela 5 - Indicativos estatísticos de desempenho do modelo proposto em comparação com valores medidos

Modelo	MBE (MJ/m ²)	MBE (%)	RMSE (MJ/m ²)	RMSE (%)	Coeficiente angular
Modelo Proposto	0,77	6,89	2,38	21,27	1,11

Figura 4 - Distribuição da irradiação solar global diária no plano vertical estimada através do modelo proposto em função dos valores medidos da irradiação solar global em superfície vertical

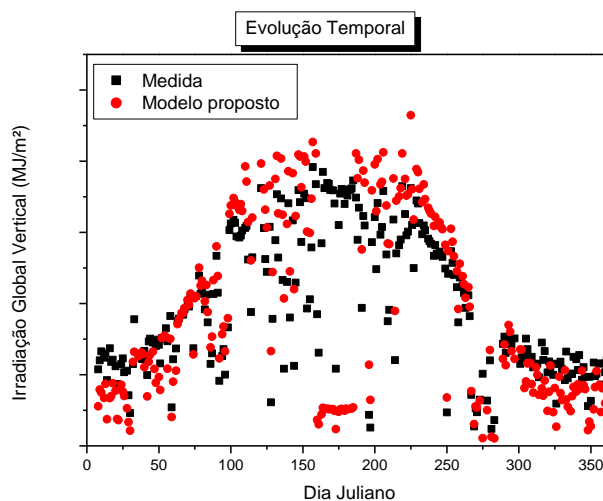


O indicativo MBE resultou em 6,89%, o que mostra que o modelo proposto superestimou as medidas da irradiação solar global vertical. Já no indicativo RMSE apresentou 21,27% de espalhamento. O coeficiente angular foi de 1,11, porém, pela figura 4, observa-se que, para valores da radiação global vertical medida inferiores à 10 MJ/m² o modelo apresentou estimativas abaixo da linha ideal, enquanto que para medidas superiores à 10 MJ/m² o modelo apresentou estimativas acima da linha ideal.

O modelo proposto mostrou bons indicativos estatísticos, com desempenho superior em relação aos modelos de Liu & Jordan, Temps & Coulson, Klucher e Geométrico. No entanto, o modelo proposto foi inferior aos modelos de Hay e Perez, visto que estes dois últimos modelos tem uma parametrização mais complexa entre as parcelas da radiação com a geometria solar.

Para verificar o desempenho temporal do modelo proposto, a figura 5 mostra a evolução temporal do modelo proposto comparado com os dados observados da irradiação solar em superfície vertical.

Figura 5 - Evolução temporal do modelo proposto comparado com os dados observados



De maneira geral, modelo apresentou bom desempenho ao longo do ano. Contudo, nos meses de verão houve subestimativa das medidas, enquanto que para o inverno, houve superestimativa da medida.

2.4 CONCLUSÃO

Neste estudo, foi concluído que:

- ✓ Avaliando o desempenho dos modelos de estimativa da irradiação solar para superfícies inclinadas testados em superfície vertical, os que apresentaram o pior desempenho foram o Geométrico, Klucher, Temps & Coulson e de Liu & Jordan. Os modelos que apresentaram bons resultados comparados com as medidas foram os modelos de Hay e Perez, sendo o de Hay o que mais se ajustou às medidas, e, portanto, o mais indicado para estimar a irradiação solar global em superfície vertical para Botucatu-SP;
- ✓ O modelo proposto mostrou bons indicativos estatísticos se comparados com os modelos da literatura;
- ✓ Mais estudos deverão ser realizados na tentativa de se melhorar a modelagem por meio da incorporação de efeitos anisotrópicos da radiação solar.

REFERENCIAS

- [1] Sevegnani, K.B.; Ghelfi Filho, H. And Silva, I.J.O. da. Comparação de vários materiais de cobertura através de índices de conforto térmico. *Sci. agric. (Piracicaba, Braz.)* [online]. 1994, vol.51, n.1 [cited 2018-06-20], pp.1-7. Available from: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-90161994000100001&lng=en&nrm=iso>. ISSN 1678-992X. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-90161994000100001>.
- [2] Carvalho, Cinara da C. S., Santos, Tatiany C. dos, Silva, Geruza C. da, Santos, Laize V., Moreira, Sóstenes de J. M., & Botelho, Luiz F. R.. (2014). Conforto térmico animal e humano em galpões de frangos de corte no semiárido mineiro. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 18(7), 769-773.
- [3] Subhashini S, Thirumaran K. A passive design solution to enhance thermal comfort in an educational building in the warm humid climatic zone of Madurai. *Journal of Building Engineering*. 2018;18:395-407.
- [4] Yao R, Costanzo V, Li X, Zhang Q, Li B. The effect of passive measures on thermal comfort and energy conservation. A case study of the hot summer and cold winter climate in the Yangtze River region. *Journal of Building Engineering*. 2018;15:298-310.
- [5] Stanciu C., Stanciu D., Dobrovicescu A., Effect of greenhouse orientation with respect to EW axis on its required heating and cooling loads, *Energy Procedia* 2016; 85:498–504.
- [6] El-Maghlany, W. M., Teamah M. A., Tanaka H., Optimum design and orientation of the greenhouses for maximum capture of solar energy in North Tropical Region. *Energy Conversion and Management* 2015, 105:1096–1104.
- [7] Brito, M.C., Freitas, S., Guimaraes, S., Catita, C., Redweik, P., 2017. The importance of facades for the solar PV potential of a Mediterranean city using LiDAR data. *Renewable Energy* 111, 85–94.
- [8] Redweik P, Catita C, Brito M. Solar energy potential on roofs and facades in an urban landscape. *Solar Energy*. 2013;97:332-341.
- [9] Varejão Silva, M.A. *Meteorologia e Climatologia*. Recife: Versão Digital, 2006. 181 p.
- [10] Liu B, Jordan R. The long-term average performance of flat-plate solar-energy collectors. *Solar Energy*. 1963;7(2):53-74.
- [11] Hay J. Calculation of monthly mean solar radiation for horizontal and inclined surfaces. *Solar Energy*. 1979;23(4):301-307.

- [12] Perez R, Seals R, Ineichen P, Stewart R, Menicucci D. A new simplified version of the perez diffuse irradiance model for tilted surfaces. *Solar Energy*. 1987;39(3):221-231.
- [13] Temps R, Coulson K. Solar radiation incident upon slopes of different orientations. *Solar Energy*. 1977;19(2):179-184.
- [14] Klucher T. Evaluation of models to predict insolation on tilted surfaces. *Solar Energy*. 1979;23(2):111-114.
- [15] Yıldırım H, Teke A, Antonanzas-Torres F. Evaluation of classical parametric models for estimating solar radiation in the Eastern Mediterranean region of Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018;82:2.053-2.065.
- [16] Barth A, Wolfer C, Lovato A, Griebler D. Avaliação da Irradiação Solar como Fonte de Energia Renovável no Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul Através de Uma Rede Neural [Internet]. Zenodo. 2018 [cited 20 June 2018]. Available from: <<http://doi.org/10.5281/zenodo.345585>>
- [17] Buriol, Galileo Adeli et al. Estimativa da radiação solar global a partir dos dados de insolação, para Santa Maria - RS. *Cienc. Rural* [online]. 2012, vol.42, n.9 , p.1563-1567.
- [18] Morettin, P. A.; Toloí, C. M. C. *Análise de Séries Temporais*. São Paulo: Edgard Blücher, 2004.
- [19] Ceballos, J. C. ; Bottino, M. J. . O modelo GL/CPTEC de radiação solar por satélite: potencial de informações para agrometeorologia. In: XV Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 2007, Aracaju, Sergipe. *Anais do CBAGRO 2007*, 2007
- [20] Codato G, Oliveira A, Soares J, Escobedo J, Gomes E, Pai A. Global and diffuse solar irradiances in urban and rural areas in southeast Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*. 2007;93(1-2):57-73.
- [21] IQBAL, M. *An Introduction To Solar Radiation*. 1. ed. Toronto: Academic Press, 1983. 390 p.
- [22] STONE, R. J. Improved statistical procedure for the evaluation of solar radiation estimation models. *Solar Energy*, v.51, n.4, p.289-91, 1993.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho foi composto por dois capítulos. No primeiro capítulo, intitulado “EVOLUÇÃO DAS MEDIDAS DA RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL EM SUPERFÍCIE VERTICAL”, foi feita uma análise das medidas da irradiação solar global em superfície vertical comparado com medidas da irradiação solar global em superfície horizontal, afim de se obter padrões quantitativos de irradiação solar vertical ao longo do ano para a região de Botucatu –SP. As conclusões do primeiro capítulo foram:

- ✓ Para a irradiação solar extraterrestre, comparando os resultados entre horizontal e vertical, observa-se uma coincidência entre valores mínimos de uma superfície com o valor máximo da outra;
- ✓ Para a irradiação solar extraterrestre e global vertical, os valores máximos são observados nos meses de inverno, e os valores de mínimo são encontrados nos meses de verão, devido à latitude simulada do hemisfério norte;
- ✓ Para o aproveitamento da irradiação solar durante o ano, nos meses de inverno, a melhor inclinação da superfície é na vertical, enquanto que para os meses de verão, a melhor inclinação da superfície é a horizontal;
- ✓ Nos meses de verão, a irradiação medida na superfície vertical é composta basicamente das parcelas difusa e refletida;
- ✓ Como recomendações para a continuidade de estudo, sugere-se analisar os dados das evoluções diurnas da radiação solar global em superfície vertical ao longo do ano, afim de se obter maiores conhecimentos do comportamento da radiação solar global em superfície vertical horária para a região.

No capítulo 2, intitulado “MODELOS DE ESTIMATIVA DA IRRADIAÇÃO SOLAR GLOBAL EM SUPERFÍCIE VERTICAL”, foram testados modelos clássicos da literatura para a estimativa da irradiação global desenvolvidos em superfícies inclinadas e foram comparados com dados da estação de radiometria de Botucatu-SP medidos em superfície vertical. No final do capítulo, foi proposto um modelo de

estimativa da irradiação solar global em superfície vertical para Botucatu-SP. As conclusões do segundo capítulo foram as seguintes:

- ✓ Avaliando o desempenho dos modelos de estimativa da irradiação solar para superfícies inclinadas testados para superfície vertical, os que apresentaram o pior desempenho foram o Geométrico, Klucher, Temps & Coulson e de Liu & Jordan. Os modelos que apresentaram bons resultados comparados com as medidas foram os modelos de Hay e Perez, sendo o de Hay o que mais se ajustou às medidas, e, portanto, o mais indicado para estimar a irradiação solar global em superfície vertical para Botucatu-SP;
- ✓ O modelo proposto mostrou bons indicativos estatísticos se comparados com os modelos da literatura;
- ✓ Mais estudos deverão ser realizados na tentativa de se melhorar a modelagem por meio da incorporação de efeitos anisotrópicos da radiação solar.

REFERÊNCIAS

- COULSON, K.L. **Solar and terrestrial radiation: Methods and measurements**. 1. ed. Academic Press, New York, 1975. 343 p.
- CUCUMO M., DE ROSSA A., FERRARO V., KALIAKATKOS D., MARINELLI V. Experimental testing of models for the estimation of hourly solar radiation on vertical surfaces at Arcavacata di Rende. **Solar Energy**, v. 81, n. 5, p. 692-695, 2007.
- DAL PAI, Alexandre. **Anisotropia da irradiância solar difusa medida pelo método de sombreamento Melo-Escobedo: fatores de correção anisotrópicos e modelos de estimativa**. Botucatu- SP, 2005. 74 f. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdades de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2005.
- GONZALEZ-PARDO, A; CESAR CHAPA, S; GONZALEZ-AGUILAR, J; ROMERO, M. Optical performance of vertical heliostat fields integrated in building façades for concentrating solar energy uses. **Solar Energy**, v. 97, p.447-459, nov. 2013.
- HALAWA, EDWARD; VAN HOOF, JOOST; SOEBARTO, VERONICA. The impacts of the thermal radiation field on thermal comfort, energy consumption and control—A critical overview. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, v. 37, p.907-918, set. 2014.
- IQBAL, M. **An Introduction To Solar Radiation**. 1. ed. Toronto: Academic Press, 1983. 390 p.
- MOHAMMADI, K.; KHORASANIZADEH, H. A review of solar radiation on vertically mounted solar surfaces and proper azimuth angles in six Iranian major cities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 47, p. 504-518, 2015.
- SCOLAR, J. **Estimativa da irradiação total sobre uma superfície inclinada a partir da irradiação global na horizontal**. 2003. 93 f. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdades de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2003.
- TAKEBAYASHI, HIDEKI; ISHII, E.; MORIYAMA, M; SAKAKI, A.; NAKAJIMA, S.; UEDA, H. Study to examine the potential for solar energy utilization based on the relationship between urban morphology and solar radiation gain on building rooftops and wall surfaces. **Solar Energy**, v. 119, p.362-369, set. 2015.
- VAREJÃO SILVA, M.A. **Meteorologia e Climatologia**. Recife: Versão Digital, 2006. 181 p.