

CAMILA PIACITELLI TIEGHI

**MEDIDAS DA RADIAÇÃO SOLAR DIFUSA EM SUPERFÍCIE VERTICAL PELO
MÉTODO DO ANEL DE SOMBREAMENTO MEO**

Botucatu

2023

CAMILA PIACITELLI TIEGHI

**MEDIDAS DA RADIAÇÃO SOLAR DIFUSA EM SUPERFÍCIE VERTICAL PELO
MÉTODO DO ANEL DE SOMBREAMENTO MEO**

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

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Dal Pai

Botucatu

2023

T561m	Tieghi, Camila Piacitelli Medidas da radiação solar difusa em superfície vertical pelo método do anel de sombreamento MEO / Camila Piacitelli Tieghi. – Botucatu, 2023 99 p. : il., tabs., fotos Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu Orientador: Alexandre Dal Pai 1. Energia Solar. 2. Difusa. 3. Fonte renovável de energia. 4. Modelos de estimativa. 5. Vertical. I. Título.
-------	--

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

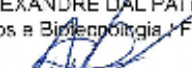
**TÍTULO DA TESE: MEDIDAS DA RADIAÇÃO SOLAR DIFUSA EM SUPERFÍCIE VERTICAL
PELO MÉTODO DO ANEL DE SOMBREAMENTO MEO**

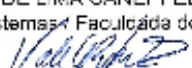
AUTORA: CAMILA PIACITELLI TIEGHI

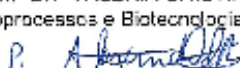
ORIENTADOR: ALEXANDRE DAL PAI

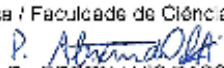
Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em Agronomia (Energia na Agricultura), pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. ALEXANDRE DAL PAI (Participação Presencial)
Bioprocessos e Biotecnologia / Faculdade de Ciências Agrômicas de Botucatu - UNESP


Prof. Dr. FERNANDO DE LIMA CANEPELE (Participação Presencial)
Engenharia de Biotecnologia / Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos - USP


Prof.ª Dr.ª VALERIA CRISTINA RODRIGUES SARNIGHAUSEN (Participação Presencial)
Bioprocessos e Biotecnologia / Faculdade de Ciências Agrômicas de Botucatu - UNESP


Prof. Dr. HELBER CUSTÓDIO DE FREITAS (Participação Virtual)
Física / Faculdade de Ciências de Bauru


Prof. Dr. EDSON LUIS BASSETTO (Participação Virtual)
Engenharia Elétrica / Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Botucatu, 03 de fevereiro de 2023

Dedico esta tese aos meus pais, que me deram a base para poder conquistar todos meus objetivos. Ao meu marido Marcos, que sempre me apoiou e incentivou no meu desenvolvimento profissional, sendo muito companheiro em todos os momentos. À minha filha Manuela, que é a força motriz para querer ser uma pessoa melhor em todos os sentidos.

AGRADECIMENTOS

À minha família, pelo apoio e compreensão nesta jornada.

Ao Prof. Dr. Alexandre Dal Pai, minha profunda gratidão pela orientação, pelos riquíssimos ensinamentos durante o Mestrado e no Doutorado, me fazendo evoluir em muitos aspectos.

A todos os professores, funcionários da FCA, e aos colegas de turma, pelo acolhimento e pela simpatia em todos os momentos.

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

“ Seu propósito na vida é encontrar um propósito e entregar a ele todo o seu coração”.

Hanh, T. N. (2001). A essência dos ensinamentos de Buda. Rio de Janeiro: Rocco.

RESUMO

A energia proveniente do Sol pode ser aproveitada para diversos fins, como conversão energética, térmica e conforto térmico. Seu uso térmico e para conforto já é difundido em diversas áreas, como Arquitetura, Engenharia civil, Agronomia e Zootecnia. O uso da energia solar como fonte geradora de eletricidade está ganhando espaço nos últimos anos, junto com a preocupação do uso de combustíveis fósseis como fonte de energia, pois além de serem limitados, são grandes causadores de emissões de CO₂ na atmosfera. A radiação solar é uma das fontes renováveis e limpas de energia. A radiação solar difusa é uma fração da radiação solar global, que incide sobre a superfície terrestre após interagir com moléculas, poeira e água dispersos na atmosfera. A fotossíntese das plantas está intimamente relacionada à radiação solar difusa. Além disso, o conhecimento da radiação difusa é essencial para projetar e monitorar coletores solares passivos e ativos, Iluminação natural, na Agricultura, promovendo o crescimento de produção de culturas, Fotografia (iluminação) e na climatização de ambientes internos. Este trabalho teve como objetivo avaliar os dados da irradiação solar difusa em superfície vertical orientada ao Norte medidos durante os anos de 2019, 2020 e 2021, na estação de radiometria do Departamento de Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia da Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP de Botucatu. No capítulo 1, foi proposto um fator de correção geométrico para o ângulo de sombreamento da radiação solar difusa medida em superfície vertical ao Norte. No capítulo 2, foi criada uma evolução das medidas da radiação solar difusa em superfície vertical, medida através de um ângulo de sombreamento do tipo MEO inclinado na vertical ao Norte, comparadas com medidas realizadas pelo mesmo método em superfície horizontal, a fim de se adquirir níveis quantitativos de irradiação solar difusa em superfície vertical ao Norte no decorrer dos anos para Botucatu–SP. Para as medidas da radiação difusa em superfície horizontal, foram obtidos os valores médios de 5 MJ/m² em 2019, 4,3 MJ/m² em 2020, 6 MJ/m² em 2021. Para a radiação difusa em superfície vertical, em 2019, os valores médios e medianos foram iguais, de 4,2 MJ/m².

Em 2020, as médias e medianas aumentaram para 5 MJ/m². Em 2021, o valor médio anual foi de 4,61 MJ/m². No capítulo 3, foram testados seis modelos clássicos de estimativa da fração difusa da radiação solar em superfícies inclinadas comparados

com medidas da radiação difusa em superfície vertical ao Norte. Devido ao alto ângulo de inclinação (90°), os resultados obtidos na aplicação dos modelos clássicos para estimativa da porção solar difusa não mostraram boa precisão comparando com dados medidos. Os dados medidos podem ser utilizados para fins de aproveitamento energético, térmico ou iluminação passiva.

Palavras-chave: energia solar; difusa; fonte renovável de energia; modelos de estimativa; vertical.

ABSTRACT

The energy from the Sun can be used for various purposes, such as energy conversion, thermal and thermal comfort. Its thermal and comfort use is already widespread in several areas, such as Architecture, Civil Engineering, Agronomy and Animal Science. The use of solar energy as a source of electricity has been gaining ground in recent years, along with the concern for the use of fossil fuels as a source of energy, as in addition to being limited, they are major causes of CO₂ emissions into the atmosphere. Solar radiation is one of the renewable and clean sources of energy. Diffuse solar radiation is a fraction of global solar radiation, which falls on the Earth's surface after interacting with molecules, dust and water dispersed in the atmosphere. Plant photosynthesis is closely related to diffuse solar radiation. In addition, knowledge of diffuse radiation is essential for designing and monitoring passive and active solar collectors, Natural lighting, in Agriculture, promoting the growth of crop production, Photography (lighting) and indoor air conditioning. This work aimed to evaluate the data of diffuse solar irradiation on a vertical surface oriented to the North measured during the years 2019, 2020 and 2021, at the radiometry station of the Department of Bioprocess Engineering and Biotechnology of the Faculty of Agricultural Sciences of UNESP in Botucatu . In Chapter 1, a geometric correction factor was proposed for the shading ring of diffuse solar radiation measured on a vertical surface to the North. In chapter 2, an evolution of the measurements of diffuse solar radiation on a vertical surface was created, measured through a shading ring of the MEO type tilted vertically to the North, compared with measurements carried out by the same method on a horizontal surface, in order to acquire quantitative levels of diffuse solar irradiation on a vertical surface to the North over the years for Botucatu-SP. For measurements of diffuse radiation on a horizontal surface, average values of 5 MJ/m² were obtained in 2019, 4.3 MJ/m² in 2020, 6 MJ/m² in 2021. For diffuse radiation on a vertical surface, in 2019, mean and median values were equal, 4.2 MJ/m².

In 2020, the averages and medians increased to 5 MJ/m². In 2021, the average annual value was 4.61 MJ/m². In Chapter 3, six classic models for estimating the diffuse fraction of solar radiation on inclined surfaces were tested, compared with measurements of diffuse radiation on a vertical surface to the North. Due to the high angle of inclination (90°), the results obtained in the application of classical models for

estimating the diffuse solar portion did not show good accuracy when compared with measured data. The measured data can be used for energy, thermal or passive lighting purposes.

Keywords: solar energy; diffuse; renewable source of energy; estimation models; vertical.

LISTA DE SÍMBOLOS

θ	Ângulo entre o feixe dos raios solares e a superfície normal (radianos);
$\theta_{z,v}$	Ângulo de incidência solar na superfície vertical (radianos);
Δ	Índice de brilho de céu;
Ω	Ângulo sólido do elemento do anel;
ψ_0	Ângulo de azimute ao nascer do sol (radianos);
ϕ	Latitude do local (radianos);
σ	Desvio-padrão;
σ^2	Variância;
δ	Declinação solar (radianos);
β	Inclinação da superfície (radianos);
b	Largura do anel (metros);
b'	Projeção do anel na esfera celestial;
θ_z	Ângulo Zenital (graus);
$d\Omega$	Ângulo sólido da área do elemento do anel;
dS	Área do elemento de anel ;
E	Índice de limpidez do céu;
$e^{-1/\cos\theta_z}$	Parcela de correção devida ao ângulo de zênite do sol θ_z ;
$E_{bl,h}$	Radiação solar difusa incidente na superfície horizontal bloqueada por um anel;
E_d	Irradiância difusa total do incidente do céu na superfície horizontal;
E_{dv}	Radiação solar difusa total incidente na superfície vertical;
F	Fator de modulação;
F_{cv}	Fator de correção de irradiação geométrico da radiação solar difusa em superfície vertical voltada para o Norte;
fD	Fator de correção isotrópica da radiação difusa proposto por Drummond (1956);
f_B	Fator de correção isotrópica da radiação difusa proposto por Battles et al. (1995);
F_p	Fator de perda para radiação difusa proposto por Oliveira et al. (2002a)
f_{DKB}	Fator de correção isotrópica da radiação difusa proposto por Dehne (1984);
H	Radiação solar global diária incidente em superfície horizontal (MJm ⁻² dia ⁻¹);

$\bar{H}$ Média mensal da radiação global diária em superfície horizontal ($\text{MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$);
 H_0 Radiação solar extraterrestre diária incidente em superfície horizontal ($\text{MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$);
 H_s Radiação solar diária anisotrópica difusa incidente em uma superfície inclinada;
 $H_{b\beta\gamma}$ Radiação solar direta diária em uma superfície inclinada orientada em qualquer direção ($\text{MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$);
 $H_{d\beta}$ Radiação solar difusa diária incidente em superfície inclinada ($\text{MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$);
 $H_{\beta\gamma}$: Radiação solar global diária em uma superfície inclinada orientada em qualquer direção ($\text{MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$);
 H_d Radiação solar difusa diária em superfície horizontal ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$);
 $\bar{H}_d$ Média mensal da radiação solar difusa diária em superfície horizontal ($\text{MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$);
 $\bar{H}_r$ Média mensal da radiação solar refletida difusa em superfície inclinada ($\text{MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$);
 $\bar{H}_s$ Média mensal da radiação solar difusa em superfície inclinada ($\text{MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$);
 $I_{\beta\gamma}$ Irradiação solar global horária em superfícies inclinadas ($\text{kJ m}^{-2}\text{h}^{-1}$);
 I Radiação solar global horária em superfície horizontal ($\text{kJ m}^{-2}\text{h}^{-1}$);
 I_{bn} Radiação direta normal [W/m^2];
 I_d Radiação solar difusa horária em superfície horizontal ($\text{kJ m}^{-2}\text{h}^{-1}$);
 I_{dc} Radiação solar difusa corrigida;
 I_{DFani} Irradiância difusa corrigida anisotropicamente (W/m^2).
 $I_{DFisoME}$ Irradiância difusa corrigida isotropicamente medida pelo anel de sombreamento MEO;
 I_r Radiação solar refletida difusa horária em superfície inclinada ($\text{kJ m}^{-2}\text{h}^{-1}$);
 I_s Radiação solar difusa horária em superfície inclinada ($\text{kJ m}^{-2}\text{h}^{-1}$);
 K_T Classificação da cobertura de céu;
 r Raio da esfera celeste;
 L Distância entre o sensor e o anel de sombreamento (metros).
 μ Média;
 N Quantidade total de dados avaliados;
 ρ_g Refletância do solo (albedo de superfície);

r	Raio da esfera celeste;
R	Raio do anel (em metros);
R_b	Fator de correção devido à mudança no ângulo de incidência dos raios solares sobre a superfície inclinada;
$\bar{R}_b$	Média mensal de R_b ;
R	Fator de relação entre a radiação global em uma superfície inclinada e em superfície horizontal;
sh	Largura da sombra projetada pelo anel sobre o sensor;
T_{calc}	Teste T;
τ^*	Fator de transmitância da radiação direta;
ω_{sr}	Ângulo horário do pôr do sol;
ω_{ss}	Ângulo horário do nascer do sol;
xi	Quantidade de dados observados;
y_i	População.

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO GERAL.....	21
	CAPÍTULO 1: FATOR DE CORREÇÃO GEOMETRICO DA RADIAÇÃO SOLAR DIFUSA MEDIDA EM SUPEFÍCIE VERTICAL.....	23
1.1	INTRODUÇÃO.....	23
1.2	REVISÃO DE LITERATURA.....	24
1.2.1	Fatores de correção para superfície horizontal.....	24
1.2.2	Método do anel de sombreamento do tipo MEO para medir a radiação solar difusa em uma superfície horizontal.....	26
1.2.3	Adaptação do anel de sombreamento do tipo MEO para medir a radiação solar difusa em superfície vertical.....	29
1.3	MATERIAL E MÉTODOS.....	31
1.3.1	Local e clima.....	31
1.3.2	Instrumentação.....	32
1.3.3	Controle de qualidade (validação de medidas).....	33
1.4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	37
1.5	CONCLUSÕES.. ..	39
	REFERÊNCIAS.....	40
	CAPÍTULO 2: MEDIDAS DA RADIAÇÃO SOLAR DIFUSA EM SUPERFÍCIE VERTICAL AO NORTE EM BOTUCATU SP.....	43
2.1	INTRODUÇÃO.....	43
2.2	REVISÃO DE LITERATURA.....	44
2.2.1	Componentes da radiação solar em superfícies inclinadas.....	44
2.2.2	Irradiação solar global diária em superfícies inclinadas.....	46
2.2.3	Relação entre a radiação global em uma superfície inclinada e em superfície horizontal.....	46
2.2.4	Radiação solar refletida.....	47
2.2.5	Anel de sombreamento para medir a radiação solar difusa em superfície vertical.....	48
2.3	MATERIAL E MÉTODOS.....	51
2.3.1	Caracterização do clima local.....	51
2.3.2	Aquisição de dados.....	52
2.3.3	Controle de qualidade (validação de medidas).....	53
2.3.4	Indicativos estatísticos.....	56
2.4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	57
2.4.1	Evolução temporal das medidas da radiação solar difusa em superfície vertical e horizontal.....	57
2.5	CONCLUSÕES.....	72

	REFERÊNCIAS.....	74
	CAPÍTULO 3: MODELOS DE ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO SOLAR DIFUSA EM SUPERFÍCIE INCLINADA.....	77
3.1	INTRODUÇÃO.....	77
3.2	REVISÃO DE LITERATURA	79
3.2.1	Modelos clássicos de estimativa da radiação solar difusa horária em superfícies inclinadas.....	79
3.2.1.1	Modelo geométrico.....	79
3.2.1.2	Modelo isotrópico de Liu & Jordan.....	79
3.2.1.3	Modelo anisotrópico de Klucher	79
3.2.1.4	Modelo anisotrópico de Hay.....	80
3.2.1.5	Modelo anisotrópico de Perez et al.....	82
3.2.2	Radiação solar difusa diária em superfícies .inclinadas.....	83
3.3	MATERIAL E MÉTODOS.....	84
3.4.1	Local e clima	84
3.4.2	Instrumentação.....	85
3.4.3	Controle de qualidade (validação de medidas).....	86
3.4.4	Indicativos estatísticos.....	90
3.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	91
3.5.1	Análise dos resultados dos modelos clássicos de estimativa da radiação solar difusa em superfície inclinada comparados com medidas em campo.....	91
3.6	CONCLUSÕES.....	94
	REFERÊNCIAS.....	96
	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	98
	REFERÊNCIAS.....	99

INTRODUÇÃO GERAL

A energia proveniente do Sol pode ser aproveitada para diversos fins, como conversão energética, térmica e conforto térmico. Seu uso térmico e para conforto já é difundido em diversas áreas, como Arquitetura, Engenharia Civil, Agronomia e Zootecnia. O uso da radiação solar como fonte geradora de energia elétrica está ganhando espaço nos últimos anos, junto com a preocupação do uso de combustíveis fósseis como fonte de energia, pois além de ser limitado, é grande causador de emissões de CO₂ na atmosfera. A radiação solar é uma das fontes renováveis e limpas de energia. O Brasil tem grande potencial para fazer o uso da radiação solar, visto que os valores médios anuais de irradiação solar global incidentes no território brasileiro variam entre 3.500 a 6.250 kWh/m².dia. Como comparativo, em países da Europa onde incentivos governamentais para o uso da energia solar são maiores que no Brasil, como na Alemanha, que incide entre 900 a 1.250 kWh/m².dia, França entre 900 a 1.650 kWh/m².dia e Espanha entre 1.200 a 1.850 kWh/m².dia (PEREIRA et al., 2017, p.13).

A matriz energética brasileira não é diversificada, deixando os brasileiros dependentes de poucas fontes de energia para suprir suas necessidades. Em 2020, 59% do fornecimento de energia elétrica brasileiro foi proveniente de hidroelétricas (EPE, 2021). Em 2013, com a falta de chuvas, diminuiu o nível dos reservatórios e deteriorou a geração de energia, que passou a ser suprida por usinas térmicas mais caras para garantir o abastecimento. Entre 2012 e 2018, teve um aumento nas tarifas de energia elétrica no Brasil em todos os setores. Os aumentos foram de 35,1% para o Rural irrigante, 23,8% para o Rural, 25,7% para a Indústria, 12,8% para o Residencial e de 19,1% para o setor Comercial e serviços (ODS BRASIL, 2022). As tarifas médias brasileiras aumentaram de 419,14 R\$/MWh em 2016, para 502,98 R\$/MWh em 2020 (EPE, 2021).

Neste sentido, se faz necessário diversificar a matriz energética brasileira, visando reduzir a dependência de usinas hidroelétricas e termoeletricas.

Atualmente, políticas de incentivo do uso da energia solar no Brasil concedem benefícios fiscais para equipamentos utilizados em geração de energia solar, sendo IPI alíquota 0 (zero) e Isenção de ICMS (Decreto 8.950/2016 páginas 362/425) e Convênio ICMS 101/97 (BRASIL, 2016; CONFAZ, 1997).

Em 2012 a ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica, publicou a Resolução Normativa 482/2012, que permite ao consumidor brasileiro gerar sua própria energia elétrica a partir de fontes renováveis ou cogeração qualificada e inclusive fornecer o excedente para a rede de distribuição de sua localidade.

Em 2015, houve uma atualização na Resolução, com melhorias, e a ANEEL criou a Resolução 687/2015, o que impulsionou o uso de centrais de micro e minigeração de energia.

Em 2021, a ANEEL criou a Resolução Normativa nº 1.000/2021, que consolida as principais regras da Agência para a prestação do serviço público de distribuição de energia elétrica, onde estão dispostos os direitos e deveres dos consumidores (ANEEL,2021).

Em 6 janeiro de 2022,o presidente brasileiro sancionou a Lei nº 14.300, que Institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e o Programa de Energia Renovável Social (PERS) (BRASIL, 2022).

Com o objetivo de ampliar a aquisição de irradiação solar anual e, consequentemente, aproveitar melhor a disponibilidade de energia solar, este trabalho propõe um fator de correção isométrico para medidas da radiação solar difusa obtidas pelo método MEO (OLIVEIRA, A. P., ESCOBEDO, J. F., MACHADO, 2002a, p. 57) de sombreamento. Além disso, serão exploradas as medidas da radiação solar difusa em superfície vertical ao longo do ano e serão testados modelos clássicos de estimativa da radiação solar difusa para Botucatu-SP.

No capítulo um será abordado o tema do fator de correção isotrópico para a radiação solar difusa em superfície vertical. No capítulo dois estão apresentadas as medidas da radiação solar difusa em superfície vertical ao Norte, durante os anos de 2019, 2020 e 2021 em Botucatu-SP. No capítulo três, constam os modelos clássicos da estimativa da radiação solar difusa para superfícies inclinadas aplicados para Botucatu - SP, a fim de verificar a concordância entre os modelos de estimativa e as medidas realizadas em campo. Os dados poderão ser utilizados para avaliar a radiação solar difusa em superfícies verticais ao Norte na região estudada para fins de aproveitamento energético, térmico ou iluminação passiva.

CAPÍTULO 1

FATOR DE CORREÇÃO GEOMÉTRICO DA RADIAÇÃO SOLAR DIFUSA MEDIDA EM SUPERFÍCIE VERTICAL

1.1 INTRODUÇÃO

A radiação solar é a fonte essencial de energia para todos os processos biológicos, químicos, físicos e atmosféricos, sem a qual não existiria vida na Terra. A radiação solar difusa é uma fração da radiação solar global, que incide sobre a superfície terrestre após interagir com moléculas, poeira e água dispersos na atmosfera. A fotossíntese das plantas está intimamente relacionada à radiação solar difusa (DURAND et al., 2021, p.1). O conhecimento sobre a radiação difusa é crucial tanto para o projeto quanto para o monitoramento de coletores solares passivos e ativos, que são responsáveis por fornecer cerca de 20% da energia solar global em dias de céu claro. Já em dias nublados, 100% da energia solar é difusa, reforçando a importância desse tipo de radiação para a obtenção de energia em qualquer condição climática (CHUNG, K.-M., CHEN, CHANG, 2018, p. 759). Portanto, esta porção da radiação é um parâmetro indispensável para modelos agrícolas, eco ambientais e para o projeto e uso de sistemas de energia solar renovável (HUSAIN, S., KHAN, 2021; WU et al., 2021, p 1).

Em todo o mundo, entre os vários métodos para medir a irradiância solar difusa, os anéis de sombreamento são os mais utilizados na pesquisa solar. Esses instrumentos funcionam com um piranômetro devidamente calibrado para a medição da irradiância solar, com um elemento de sombreamento, que pode ser um disco ou um anel, que evita a incidência de radiação solar direta solar no sensor. Este método, além de ser mais econômico, é capaz de fazer medições precisas. Porém, as medidas devem ser corrigidas por meio de um fator de correção anel geométrico, de modo a quantificar a incidência de radiação solar difusa que o anel bloqueia ao alcançar o sensor. Vários autores desenvolveram diferentes expressões para esse fator de correção, porém, a maioria se aplica apenas a para superfícies horizontais (BATTLES, F. J.; OLMO, F. J.; ALADOS-ARBOLEDAS, 1995, p. 105; DAL PAI et al., 2016, p. 754; DE SIMÓN-MARTÍN, M., DÍEZ-MEDIAVILLA, M.; ALONSO-TRISTÁN, C., 2016, p. 85; RODRÍGUEZ-MUÑOZ et al., 2021, p. 830).

Neste trabalho é apresentado uma abordagem para calcular o fator de correção geométrico para um sensor inclinado em superfície vertical ao Norte, pelo método de sombreamento MEO (OLIVEIRA, A. P., ESCOBEDO, J. F., MACHADO, 2002a, p. 700).

Este trabalho tem como objetivos:

- ✓ Propor um fator de correção para a radiação solar difusa em superfície vertical ao Norte para Botucatu-SP;
- ✓ Comparar com fatores de correção desenvolvidos para radiação solar difusa em superfície horizontal.

1.2 REVISÃO DE LITERATURA

1.2.1 Fatores de correção para superfície horizontais

A utilização do anel de sombreamento para medir a radiação solar difusa requer a aplicação de um fator de correção, que leva em consideração que parte da radiação difusa é bloqueada pelo anel, como os propostos por Battles et al. (1995), Dal Pai, Escobedo & Corrêa (2011), Drummond (1956), Jacovides et al. (1996), Lebaron et al. (1990), Melo (1993), Oliveira et al. (2002a), entre outros. Para o anel de sombreamento MEO em superfície horizontal, existem fatores de correção para corrigir as características da geometria do anel, geográfica e astronômica (MELO, 1994, p. 1; OLIVEIRA et al., 2002^a, p. 57; DAL PAI, 2005, p. 754).

O fator de correção proposto por Drummond (1956), sugere uma correção isotrópica da radiação difusa, de acordo com as equações 1 e 2 a seguir.

$$f_D = 1/(1 - X) \quad (1)$$

Onde X representa a fração do hemisfério coberta pelo anel, expressa por

$$X = \frac{2b}{\pi r} \cos^3 \delta \left(\frac{\pi}{180} \psi_0 \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \sin \psi_0 \right) \quad (2)$$

Onde: b é a largura do anel; r é o raio, δ Declinação solar; ψ_0 o ângulo azimutal ao nascer do sol ; ϕ Latitude local.

Este modelo leva em conta somente os fatores geométricos do anel e não considera o efeito anisotrópico da radiação difusa, que varia ao longo do dia em função da movimentação solar, nem tampouco a cobertura do céu.

O modelo proposto por Dehne (1984), baseado no modelo de Kasten et al. (1983), acrescenta um fator que considera a transmitância da radiação direta proveniente da atmosfera. A correlação proposta é a seguinte:

$$f_{DKB} = a + b \left(\frac{I_d}{I} \right)^3 + c \delta + d(1/\tau^*) \quad (3)$$

Onde I é a radiação global incidente na superfície horizontal [W/m^2], δ é a declinação solar do dia [graus] e τ^* é o fator de transmitância da radiação direta expresso por:

$$\tau^* = \log (I_0/(I - I_d)) \quad (4)$$

Onde I_0 é a radiação extraterrestre na superfície horizontal [W/m^2] e I_d é a radiação difusa medida com anel [W/m^2]. O último fator de correção analisado é proposto por Battles et al. (1995). Esse fator é baseado no modelo de Lebaron et al. (1990) e é expresso pela equação:

$$f_B = a f_D + b \log \Delta + c \log \varepsilon + d e^{-1/\cos \theta_Z} \quad (5)$$

Na equação 5, f_D é o fator de correção isotrópico de Drummond (1956), que equivale a parcela geométrica, Δ : brilhância do céu; ε : limpidez do céu; $e^{-1/\cos \theta_Z}$ corresponde a parcela de correção devida ao ângulo de zênite do sol θ_Z . Δ e ε são expressos pelas equações que seguem:

$$\Delta = \frac{I_d}{I_0} \cos \theta_Z \quad (6)$$

$$\varepsilon = (I_d + I_{bn})/I_d \quad (7)$$

Onde I_{bn} é a radiação direta normal [W/m^2]. A radiação difusa corrigida é apresentada na equação 8, á seguir:

$$I_{dc} = f_B * I_d \quad (8)$$

As constantes a, b, c e d são determinadas, minimizando-se a soma dos quadrados dos resíduos correspondentes a diferença entre I_{dc} expresso pela equação (8) e os valores medidos.

1.2.2 Método do anel de sombreamento do tipo MEO para medir a radiação solar difusa em uma superfície horizontal

Segundo Chaiyapinunt et al. (2016) (Figura 1), para uma abóbada celeste isotrópica, a irradiância difusa total do incidente do céu na superfície horizontal pode ser escrita como

$$E_d = \pi I_d \quad (9)$$

Onde I_d é o componente difuso da radiação solar (intensidade solar difusa) do céu.

Portanto, a quantidade de radiação solar difusa incidente na superfície horizontal bloqueada por um anel de largura b $E_{bl,h}$ durante o dia pode ser expressa como:

$$E_{bl,h} = \int_{\omega_{sr}}^{\omega_{ss}} I_d \cos(\theta_z) d\Omega \quad (10)$$

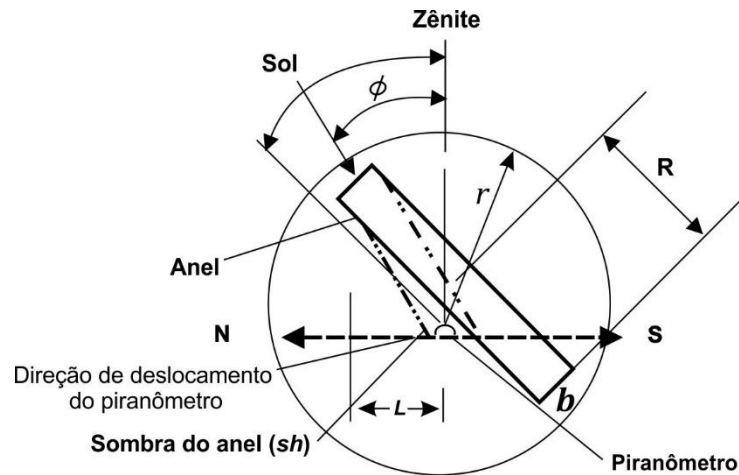
Onde Ω é o ângulo sólido do elemento do anel de área, ω_{ss} é o ângulo horário do nascer do sol e ω_{sr} é o ângulo horário do pôr do sol. O ângulo sólido pode ser expresso como:

$$d\Omega = dS / r^2 \quad (11)$$

Onde dS é a área do elemento de anel que pode ser expressa como:

$$dS = b' R d\omega \quad (12)$$

Figura 1 - Representação esquemática do piranômetro sobre anel de sombreamento do tipo MEO em superfície horizontal



Fonte: Adaptado de Chaiyapinunt et al. (2016, p. 631)

Neste sistema, o anel de sombreamento é fixo e inclinado em um ângulo igual à latitude local. Para compensar a declinação solar, o piranômetro se move paralelamente ao plano do horizonte local em uma base móvel para permanecer sob a sombra produzida pelo anel.

Ao relacionar os parâmetros descritos na Figura 1 com o dispositivo de sombra do tipo detector móvel, com o piranômetro instalado no plano horizontal, os parâmetros relativos ao dispositivo de anel de sombra podem ser obtidos. O anel de sombreamento é instalado com um ângulo inclinado igual à latitude local. O raio da esfera celeste é igual a equação 13, a seguir:

$$r = R \left[\frac{\cos(\phi)}{\phi + \delta} \right] \quad (13)$$

A projeção do anel na esfera celestia pode ser escrita como:

$$b' = \cos(\delta) \quad (14)$$

O ângulo sólido da área do elemento do anel pode ser escrito como:

$$d\Omega = \frac{b}{R} \cos(\delta) \left[\frac{\cos(\phi + \delta)}{\cos(\phi)} \right]^2 d\omega \quad (15)$$

Onde R o raio do anel (em metros).

A largura da sombra

Odo anel projetada sobre o sensor instalado no centro do anel pode ser escrita como:

$$sh = \frac{b \cos(\delta)}{\cos(\phi + \delta)} \quad (16)$$

A distância (L) entre o sensor e o anel de sombreamento pode ser escrita como:

$$L = R \cos(\phi) \tan(\phi + \delta) \quad (17)$$

Para a montagem MEO em superfície horizontal, Oliveira et al. (2002a) desenvolveram analiticamente a fração de perda para o anel (equação 18) em função de parâmetros geométricos e geográficos.

$$F_p = \frac{2b}{\pi R} \cos(\delta) \left(\frac{\cos(\phi + \delta)}{\cos(\phi)} \right)^2 \int_0^{w_s} \cos(\theta_z) dw \quad (18)$$

Onde b é a largura do anel (em metros), δ a declinação solar, ϕ a latitude do local, w_s o ângulo horário e θ_z o ângulo zenital.

No intuito de aprimorar o fator correção, considerando a anisotropia da radiação solar, em 2011, Dal Pai et al. empregaram fatores de correções anisotrópicos em função da classificação da cobertura de céu (K_T), contemplando a fração circunsolar da radiação solar, responsável pelo efeito anisotrópico da radiação difusa. Tais efeitos são causados pelas partículas dispersas na atmosfera como turbidez, nebulosidade, vapor de água, poluição etc. (IQBAL, 1983, p. 85; LEBARON et al., 1990, p. 249; BATTLES et al., 1995, p. 105; DAL PAI et al., 2016, p. 754).

O coeficiente de transmissividade atmosférica da radiação global (K_T) ou índice de claridade é obtido pela razão entre a radiação global (H_G) e a radiação no topo da atmosfera (H_0). A tabela 1 a seguir apresenta os fatores de correção anisotrópicos em função do intervalo de K_T para a radiação difusa pelo método anel de sombreamento MEO (DAL PAI et al., 2016, p.758).

Tabela 1 - Fatores de correção anisotrópicos em função do intervalo de K_T para a radiação difusa pelo método anel de sombreamento MEO

Intervalo de K_T	Cobertura de céu	Equação de Correção Anisotrópica
$0 \leq K_T < 0,35$	Nublado	$I_{DFani} = 0,973 I_{DFisoME}$
$0,35 \leq K_T < 0,65$	Parcialmente nublado	$I_{DFani} = 1,045 I_{DFisoME}$
$0,65 \leq K_T < 1$	Aberto	$I_{DFani} = 1,125 I_{DFisoME}$

Fonte: Dal Pai et al., 2011, p. 758.

Onde I_{DFani} é a Irradiância difusa corrigida anisotropicamente (W/m^2). $I_{DFisoME}$ é a Irradiância difusa corrigida isotropicamente medida pelo anel de sombreamento.

1.2.3 Adaptação do anel de sombreamento do tipo MEO para medir a radiação solar difusa em superfície vertical

Quando se trata de uma superfície vertical, a radiação solar incidente é composta pela radiação solar proveniente do céu (direta e difusa) e pela radiação solar refletida pelo solo. A radiação solar total incidente na superfície vertical pode ser expressa da seguinte forma (IQBAL, 1983, p. 304):

$$E_v = E_{bv} + E_{ds} + E_{rg} \quad (19)$$

Onde E_v é o incidente de radiação solar global na superfície vertical, E_{bv} é a radiação solar direta incidente na superfície vertical, E_{ds} é a radiação solar difusa incidente na superfície vertical e E_{rg} é a radiação solar refletida do incidente sobre a superfície vertical.

Segundo Chaiyapinunt et al. (2016), para condições de céu isotrópico, a radiação solar difusa total incidente na superfície vertical pode ser escrita como:

$$E_{dv} = \frac{\pi}{2} I_d + \frac{\pi}{2} \rho_g I_d \quad (20)$$

Onde E_{dv} é a radiação solar difusa total incidente na superfície vertical e ρ_g é a refletância do solo (albedo de superfície).

Portanto, a quantidade de radiação solar difusa incidente na superfície vertical bloqueada por um anel de largura b ($E_{bi,v}$) pode ser expresso como (CHAIYAPINUNT et al., 2016, p. 631):

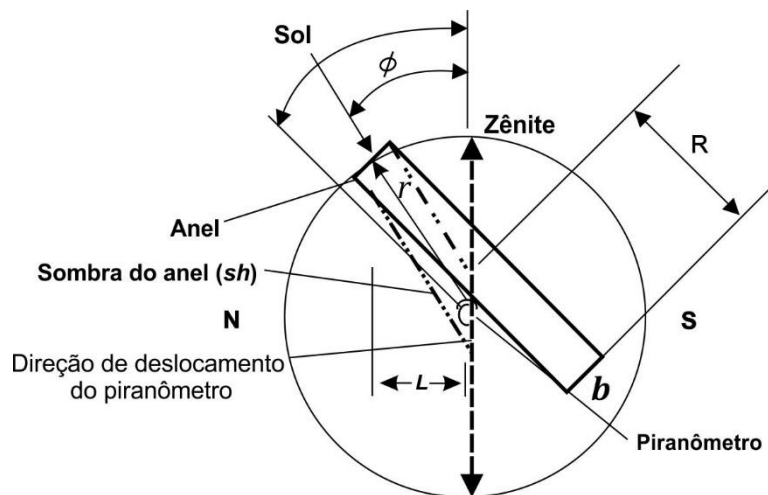
$$E_{bi,v} = \int_{\omega_{gr}}^{\omega_{ss}} I_d \cos \theta_{z,v} d\Omega \quad (21)$$

Onde $\theta_{z,v}$ é o ângulo de incidência solar na superfície vertical. A relação entre o ângulo de incidência solar, a duração do pôr do sol e do nascer do sol pode ser derivada de acordo com os trabalhos de Klein (1977), Gopinatha (1991), Burek et al. (1988). A relação entre o ângulo de incidência solar na superfície vertical voltada para o norte e outros ângulos relacionados pode ser expressa como:

$$\cos \theta_{z,v} = \sin \left(\phi - \frac{\pi}{2} \right) \sin(\delta) + \cos \left(\phi - \frac{\pi}{2} \right) \cos(\delta) \cos(\omega) \quad (22)$$

A Figura 2 apresenta uma representação esquemática do piranômetro, um instrumento utilizado para medir a irradiância solar global, posicionado sobre um anel de sombreamento do tipo MEO em uma superfície vertical.

Figura 2 - Representação esquemática do piranômetro sobre anel de sombreamento do tipo MEO em superfície vertical



Fonte: Do autor.

Relacionando os parâmetros descritos na Figura 2 com o dispositivo de sombra do tipo detector móvel com o piranômetro instalado no plano vertical ao Norte, os parâmetros relativos ao dispositivo de anel de sombreamento para superfície vertical

podem ser obtidos. O anel de anel de sombreamento é instalado com um ângulo de inclinação igual à latitude local.

Como a duração entre o pôr-do-sol e o nascer do sol, visto da superfície vertical voltada para o Norte, é igual, o fator de correção responsável pela parte bloqueada da irradiação solar difusa em uma superfície vertical voltada para o Norte é descrito como (CHAIYAPINUNT et al., 2016, p. 633):

$$F_{cv} = \left(1 - \left(\frac{4b}{\pi R(1 + \rho_s)}\right) \cos(\delta) \left[\frac{\cos(\phi - \delta)}{\cos(\phi)}\right]^2 [\omega_{sv} \sin\left(\phi + \frac{\pi}{2}\right) \sin(\delta) + \cos\left(\phi + \frac{\pi}{2}\right) \cos(\delta) \sin(\omega_{sv})]\right)^{-1} \quad (23)$$

b é a largura do anel, em metros; R raio do círculo, em metros, formado pela trajetória do Sol, em metros; ρ_s é a refletância do solo (albedo de superfície); δ é a declinação solar; ϕ é a latitude local; ω_{sv} é o ângulo horário para superfície vertical voltada para o norte (em radianos), que pode ser avaliado a partir da relação dada como:

$$\omega_{sv} = \min [\cos^{-1}(-\tan(\phi) \tan(\delta)), \cos^{-1}(-\tan(\phi + 90) \tan(\delta))] \quad (24)$$

“min” na equação é o menor dos dois termos entre colchetes.

1.3 MATERIAL E MÉTODOS

1.3.1 Local e clima

Este estudo foi realizado utilizando medidas da irradiação solar difusa em planos horizontal e vertical orientado ao Norte geográfico, situado na estação de radiometria do Departamento de Engenharia de Bioprocessos da Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP de Botucatu (latitude 22° 54' S, longitude 48° 27' O e altitude 716 m). As medidas foram realizadas no período de 2019, 2020 e 2021. A cidade de Botucatu possui 148.130 habitantes e fica localizada próxima à 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 do tipo Cwa, que corresponde a um clima subtropical úmido. Durante o verão, o clima é quente, úmido e chuvoso, enquanto o inverno apresenta temperaturas amenas e seco. Os

valores de temperatura e umidade relativa do ar variam de acordo com as mudanças astronômicas, sendo que os valores máximos são registrados em fevereiro (23,12 °C e 78,25%, respectivamente) e os valores mínimos de temperatura são observados em julho (17,10 °C) e de umidade relativa em agosto (63,97%). A estação chuvosa ocorre durante o verão e a primavera, acompanhada de grande nebulosidade. Cerca de 80% da precipitação anual concentra-se nesse período, com o pico máximo de chuvas em janeiro (246,2 mm). Durante o inverno e o outono, a média de precipitação mensal é inferior a 100 mm, sendo que o valor mínimo é registrado em agosto (36,1 mm) (TIEGHI, 2018, p.25).

1.3.2 Instrumentação

As medidas instantâneas foram coletadas a cada 1 minuto por um *Datalogger* modelo CR3000 da Campbell Scientific, armazenando os dados em W/m^2 , entre janeiro a dezembro de 2019, 2020 e 2021.

A irradiância solar difusa em superfície horizontal foi medida com o piranômetro da marca Eppley PSP. A irradiância solar difusa em superfície vertical foi medida com o piranômetro Eppley 8-48. Para medir a irradiância difusa em superfície vertical, o piranômetro foi posicionado sobre plano inclinado à 90° com a face voltada para o Norte, sob um anel de sombreamento do tipo MEO, conforme Figura 3, a seguir:

Figura 3 - Piranômetro Eppley 8-48 em superfície vertical ao Norte sob anel de sombreamento MEO



Fonte: Do autor.

1.3.3 Controle de qualidade (validação de medidas)

O procedimento de controle de qualidade foi aplicado para avaliar a confiabilidade das medidas, uma vez que podem ter sido afetadas por problemas causados pela instrumentação (efeito do cosseno, seletividade espectral e desalinhamento no anel de sombreamento) ou por eventos externos (excremento de aves, orvalho sobre o sensor e rompimento do cabeamento) no local de medição (MUNEER; YOUNES; MUNAWWAR, 2007, p. 554). Portanto, foram impostas condições para identificar e descartar valores incorretos (acima ou abaixo do esperado), na partição temporal instantânea (medidas coletadas a cada 1 minuto), horária e diária, para cada componente medidas (Tabela 2): irradiância global em superfícies horizontal e vertical, difusa em superfícies horizontal e vertical, direta em superfície horizontal e refletida (albedo).

Tabela 2 - Condições de avaliação de medidas do procedimento de controle de qualidade

Tempo	Condição de avaliação	Medida afetada
INSTANTÂNEA (1ª ETAPA) LIMITES FISICAMENTE POSSÍVEIS	$E \leq 5^\circ$	GHI, GVI, DHI, DVI, BHI, RHI
	$0 < GHI \leq (EHI * 1.20)$	GHI
	$0 < DHI \leq (EHI * 0.80)$	DHI
	$0 \leq BHI \leq EHI$	BHI
	$0 \leq RHI \leq (GHI * 0.50)$	BHI
	$0 < GVI$	GVI
	$0 < DVI$	DVI
	$(DHI / GHI) \leq 1.05$	GHI, DHI
	Quando $E > 15^\circ$ e $GHI > 50 \text{ W/m}^2$	GHI, DHI
	$(DHI / GHI) \leq 1.10$	GHI, DHI
INSTANTÂNEA (2ª ETAPA) COMPARAÇÃO ENTRE COMPONENTES	Quando $E \leq 15^\circ$ e $GHI > 50 \text{ W/m}^2$	GHI, DHI
	$(DVI / GVI) \leq 1.05$	GVI, DVI
	Quando $E > 15^\circ$ e $GVI > 50 \text{ W/m}^2$	GVI, DVI
	$(DVI / GVI) \leq 1.10$	GVI, DVI
	Quando $E \leq 15^\circ$ e $GVI > 50 \text{ W/m}^2$	GVI, DVI
	$0 < GHI \leq EHI$	GHI
	$0 < DHI < GHI$	DHI
	$0 < BHI < GHI$	BHI
	$0 < RHI < GHI$	RHI
	$0 < GVI \leq EHI$	GVI
HORÁRIA LIMITES FISICAMENTE POSSÍVEIS	$0 < DVI < GVI$	GVI
	$0 < GHI \leq EHI$	GHI
	$0 < DHI < GHI$	DHI
	$0 < BHI < GHI$	BHI
	$0 < RHI < GHI$	RHI
	$0 < GVI \leq EHI$	GVI
	$0 < DVI < GVI$	GVI
	$0 < GHI \leq EHI$	GHI
	$0 < DHI < GHI$	DHI
	$0 < BHI < GHI$	BHI
DIÁRIA LIMITES FISICAMENTE POSSÍVEIS	$0 < RHI < GHI$	RHI
	$0 < GVI \leq EHI$	GVI
	$0 < DVI < GVI$	GVI
	$0 < DVI < GVI$	GVI

Fonte: Do autor.

Legenda: **EHI** = Extraterrestrial Horizontal Irradiation/Irradiance (Extraterrestre); **GHI** = Global Horizontal Irradiation/Irradiance (Global Horizontal); **GVI** = Global Vertical Irradiation/Irradiance (Global Vertical); **DHI** = Diffuse Horizontal Irradiation/Irradiance (Difusa Horizontal); **DVI** = Diffuse Vertical Irradiation/Irradiance (Difusa Vertical); **BHI** = Direct-Beam Horizontal Irradiation/Irradiance (Direta Horizontal); **RHI** = Reflected Horizontal Irradiation/Irradiance (Refletida); **E** = Solar Elevation (Elevação Solar).

O efeito do cosseno, ângulo em que a radiação solar atinge o sensor, é o problema mais recorrente em piranômetros (MUNEER; YOUNES; MUNAWWAR, 2007, p. 554). Pois quanto mais agudo for, geralmente ao nascer e pôr do sol, maior é a inexatidão do valor mensurado. Neste sentido, as medidas adquiridas em

elevações solares inferiores à 5° (IQBAL, 1983, p. 15) (momentos após o nascer e antes do pôr do sol) foram descartadas para este estudo. Posteriormente, uma série de avaliações foi aplicada para identificar medidas errôneas, permitindo descartar os valores rejeitados pelas condições impostas. O procedimento da Comissão Internacional de Iluminação - CIE (TREGENZA et al., 1994, p. 1) foi utilizado para identificar medidas abaixo ou acima do limite fisicamente possível na partição temporal instantânea (Tabela 3), horária (Tabela 4) e diária (Tabela 5), tal que o procedimento da *Baseline Surface Radiation Network* - BSRN (LONG; DUTTON, 2002, p.1) foi aplicado para comparar as componentes medidas na partição temporal instantânea.

Tabela 3 - Resultado da avaliação das medidas em partição temporal instantânea

Irradiância	Medidas	Medidas restantes após	
	Brutas	1ª etapa	2ª etapa
GHI	596.662	554.316	512.037
GVI	599.414	559.463	539.304
DHI	589.724	549.743	507.464
DVI	600.320	548.691	528.532
BHI	595.038	496.043	496.043
RHI	608.748	544.699	544.699

Fonte: Do autor.

Legenda: **GHI** = Global Horizontal Irradiance (Global Horizontal); **GVI** = Global Vertical Irradiance (Global Vertical); **DHI** = Diffuse Horizontal Irradiance (Difusa Horizontal); **DVI** = Diffuse Vertical Irradiance (Difusa Vertical); **BHI** = Direct-Beam Horizontal Irradiance (Direta Horizontal); **RHI** = Reflected Horizontal Irradiance (Refletida).

Após a aplicação do procedimento de avaliação das medições em partição temporal instantânea os valores foram integrados para se obter as medidas horárias, que também passaram pelo processo de controle de qualidade (Tabela 4). Seguindo o mesmo raciocínio as medidas que não atenderam a condição de avaliação foram descartadas.

Tabela 4 - Resultado da avaliação das medidas em partição temporal horária

Irradiância	Medidas	
	Antes da avaliação	Após avaliação
GHI	10.339	10.339
GVI	10.125	9.406
DHI	10.246	9.395
DVI	10.226	9.701
BHI	9.965	9.270
RHI	10.391	10.146

Fonte: Do autor.

Legenda: **GHI** = Global Horizontal Irradiation (Global Horizontal); **GVI** = Global Vertical Irradiation (Global Vertical); **DHI** = Diffuse Horizontal Irradiation (Difusa Horizontal); **DVI** = Diffuse Vertical Irradiation (Difusa Vertical); **BHI** = Direct-Beam Horizontal Irradiation (Direta Horizontal); **RHI** = Reflected Horizontal Irradiation (Refletida).

Por fim, após a realização da avaliação dos valores horários as medidas foram somadas para o período completo de um dia, gerando o arquivo final com as medidas em partição temporal diária, onde os valores também passaram por um processo de avaliação de sua qualidade, de forma que ao serem rejeitados pelas condições impostas eram descartados do conjunto final de medições (Tabela 5).

Tabela 5 - Resultado da avaliação das medidas em partição temporal diária

Irradiância	Medidas	
	Antes da avaliação	Após avaliação
GHI	882	882
GVI	854	854
DHI	872	872
DVI	868	861
BHI	875	863
RHI	883	871

Fonte: Do autor.

Legenda: **GHI** = Global Horizontal Irradiation (Global Horizontal); **GVI** = Global Vertical Irradiation (Global Vertical); **DHI** = Diffuse Horizontal Irradiation (Difusa Horizontal);

DVI = Diffuse Vertical Irradiation (Difusa Vertical); **BHI** = Direct-Beam Horizontal Irradiation (Direta Horizontal); **RHI** = Reflected Horizontal Irradiation (Refletida).

1.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para obtenção do fator de correção isotópico da radiação difusa em superfície vertical ao Norte, foi aplicada a equação

$$F_{cv} = \left(1 - \left(\frac{4b}{\pi R(1 + \rho_s)}\right) \cos(\delta) \left[\frac{\cos(\phi - \delta)}{\cos(\phi)}\right]^2 [\omega_{sv} \sin\left(\phi + \frac{\pi}{2}\right) \sin(\delta) + \cos\left(\phi + \frac{\pi}{2}\right) \cos(\delta) \sin(\omega_{sv})]\right)^{-1} \quad (24)$$

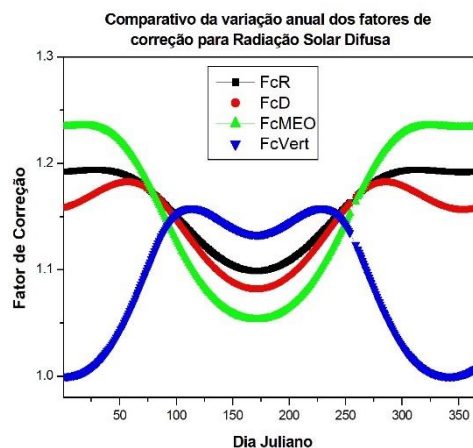
Onde os valores de b (largura do anel) foi de 0,1 m, o R (raio do anel) de 0,4 m e de ρ_s (albedo) foi de 0,23, pelo fato do anel estar sob a grama.

Na montagem de Drummond, o piranômetro é mantido fixo, enquanto um anel de sombreamento com raio de 0,3 m e com largura de 0,5 m, translada paralelamente ao eixo polar. Essa movimentação é necessária para compensar as variações da declinação solar ao longo do ano, garantindo que a medição seja precisa em qualquer época do ano (DRUMMOND, 1984, p. 419).

Já na montagem de Robinson e Stoch, o piranômetro é fixado no centro de um anel com raio de 0,5 m e largura de 0,1 m, que é rotacionado em torno do seu próprio centro. Essa rotação é responsável por compensar as variações da declinação solar, mantendo a precisão das medições (ROBINSON ; STOCH, 1964, p 190).

O resultado da aplicação do fator de correção geométrico para a montagem do tipo MEO comparado com as montagens de Drummond (1956), Robinson & Stoch (1964), e Oliveira, Escobedo & Machado (2002a) ao longo do ano está apresentado na Figura 4, a seguir.

Figura 4 - Gráfico comparativo entre fatores de correção para superfície vertical ao Norte com os fatores de correções de Robinson & Stoch (1964), Drummond (1956), MEO (2002a) ao longo do ano para Botucatu-SP



Fonte: Do autor.

Os valores dos fatores de correção comparativos foram desenvolvidos para serem aplicados em superfícies horizontais. No entanto, como mostrado na equação 17 (pg. 25), o fator de correção para o ângulo de sombreamento do tipo MEO apresenta um comportamento de variação diferente quando a superfície é inclinada. Isso ocorre porque a incidência de radiação solar na face Norte é diferente daquela na horizontal. Fisicamente, uma superfície inclinada a 90° em relação ao Norte simula a incidência solar em uma localidade de latitude mais alta ($67,4^\circ$ N), o que resulta em uma grande variação no ganho energético ao longo do ano.

Isso acontece por conta da posição do Sol durante os meses de inverno, que fica mais ao Norte. Para maior captação energética nesta época do ano, no hemisfério Sul, o melhor ângulo de inclinação será ao Norte. Por este motivo foi escolhida a face Norte neste estudo. Durante o inverno, período que o gasto energético com aquecimento de água, o uso de aquecedores térmicos e elétricos são utilizados com frequência, se faz necessário o uso eficiente dos painéis solares, ajustando-os na face Norte das construções.

A Figura 4, na legenda azul, mostra o gráfico obtido através da aplicação do fator de correção para superfície vertical ao Norte ao longo do ano para Botucatu-SP. Os valores de máximo (1.157) se encontram entre os dias julianos 109 a 119 e 223 a 234.

A Tabela 6 mostra o valor médio, desvio padrão (DP), valores de máximo e mínimo do fator de correção da radiação solar difusa e vertical para Botucatu – SP. Os valores de mínimo (1) se encontram entre os dias juliano 1 a 27 e 317 a 365. Neste período do ano, por conta da declinação solar, o disco solar passa atrás do sensor. Portanto, não há sombra do Sol no piranômetro voltado para o norte durante esse período, ou seja, não há necessidade para corrigir o efeito de bloqueio do anel de sombra e o fator de correção é igual a 1.

Tabela 6- Valor médio, desvio padrão (DP), valores de máximo e mínimo do fator de correção da radiação solar difusa e vertical para Botucatu – SP

Média ($\pm$ DP)	Máximo	Mínimo
1.08 (0.06)	1.157	1

Fonte: Do autor.

1.5 CONCLUSÕES

Neste estudo, foi concluído que:

- ✓ O comportamento da variação do fator de correção é visivelmente diferente, pois a incidência de radiação solar para a face Norte é diferente comparada com a horizontal. Fisicamente, uma superfície inclinada à 90° ao Norte simula a incidência solar em uma localidade de latitude maior (67,4° N), com grande variação no ganho energético ao longo do ano;
- ✓ Os valores de mínimo (1) se encontram entre os dias juliano 1 a 27 e 317 a 365. Neste período do ano, por conta da declinação solar, o disco solar passa atrás do sensor. Portanto, não há sombra do sol no piranômetro voltado para o norte durante esse período, ou seja, não há necessidade para corrigir o efeito de bloqueio do anel de sombra e o fator de correção é igual a 1;
- ✓ Com este fator de correção é possível mensurar pelo método do anel de sombreamento a irradiação solar difusa incidente em superfícies verticais, tais como fachadas de prédios e casas, a fim de quantificar os níveis de iluminação passiva, etc.

REFERÊNCIAS

BATTLES, F. J.; OLMO, F. J.; ALADOS-ARBOLEDAS, L. On shadowband correction methods for diffuse irradiance measurements. **Solar Energy**, Kidlington, v. 54, n. 2, p. 105-114, 1995.

BUREK, S. A. M.; NORTON, B.; PROBERT, S. D. Analytical and experimental methods for shadow-band correction factors for solarimeters on inclined planes under isotropically diffuse and overcast skies. **Solar Energy**, v. 40, n. 2, p. 151–160, 1988.

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**, Kidlington, v. 136, p. 629–638, 2016.

CHUNG, K.-M., CHEN, C.-C. CHANG, K.-C.. Effect of diffuse solar radiation on the thermal performance of solar collectors. **Case Studies in Thermal Engineering**, Amsterdam, v. 12, p. 759-764, 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214157X17302149>>. Acesso em: 16 nov. 2021.

DAL PAI, A. **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 Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2005.

DAL PAI, A. ESCOBEDO, J. F. CORRÊA, F. H. P. Numerical correction for the diffuse solar irradiance by the melo-escobedo shadowring measuring method 30th ISES Biennial Solar World Congress 2011, SWC 2011, v. 5, p. 3692-3703, 2011. Disponível em < <http://proceedings.ises.org/paper/swc2011/swc2011-0333-DalPai.pdf> > Acesso em: 15 fev. 2023.

DAL PAI, A., Escobedo, J. F., Pai, E. D., Oliveira, A. P., Soares, J. R., & Codato, G. (2016). MEO shadowring method for measuring diffuse solar irradiance: Corrections based on sky cover. **Renewable Energy**, Oxford, 99, 754-763. doi:10.1016/j.renene.2016.07.026

DE SIMÓN-MARTÍN, MIGUEL, Díez-Mediavilla, Montserrat; Alonso-Tristán, Cristina. Shadow-band radiometer measurement of diffuse solar irradiance: Calculation of geometrical and total correction factors. **Solar Energy**, Kidlington, v. 139, p. 85-99, 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X16304327>>. Acesso em: 16 nov. 2021.

DEHNE, K, Diffuse solar radiation measured by the shade ring method improved by a correction formula, Report n. 15 World Meteorological Organization, Geneva, Suíça, 1984.

DRUMMOND, A. J. On the measurements of sky radiation. **Archiv. fur Meteorologie. Geophysik Bioklimatologie**, v.7, p.413-36, 1956.

DURAND, M., MURCHIE, E. H. LINDFORS, A. V. et al. Diffuse solar radiation and canopy photosynthesis in a changing environment. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 311, p. 108684, 2021. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192321003701>>. Acesso em: 16 nov. 2021.

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

GOPINATHAN, K.K. Solar radiation on variously oriented sloping surfaces. **Solar Energy**, v. 47, n. 3, p. 173–179, 1991.

HUSAIN, S., KHAN, U. ALI. Machine learning models to predict diffuse solar radiation based on diffuse fraction and diffusion coefficient models for humid-subtropical climatic zone of India. **Cleaner Engineering and Technology**, London, v. 5, p. 100262, 2021. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666790821002226>>. Acesso em: 16 nov. 2021.

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

KASTEN, F.; DEHNE, K.; BRETTSCHEIDER, W. Improvement of Measurement of Diffuse Solar Radiation. **Solar Radiation Data**, p. 221–225, 1983.

KLEIN, S.A. Calculation of monthly average insolation on tilted surfaces. **Solar Energy**, v. 19, n. 4, p. 325–329, 1977.

LEBARON, B. A.; Michalsky, J. J.; Perez, R. A simple procedure for correcting shadowband data for all sky conditions. **Solar Energy**, Kidlington, v.44, n.5, p.249-56, 1990.

LONG, C. N.; DUTTON, E. G. BSRN Global Network Recommended Quality Control Tests. **BSRN Technical Report**, v. 2, 2002. Disponível em: <https://epic.awi.de/id/eprint/30083/1/BSRN_recommended_QC_tests_V2.pdf>. Acesso em: 06 nov. 2022

MELO, J. M. D., ESCOBEDO, J. F. Medida da radiação solar difusa. In: ENERGIAS LÍMPIAS EN PROGRESO, VII CONGRESO IBÉRICO DE ENERGIA SOLAR, Vigo, Espanha. **Anais INTERNATIONAL SOLAR ENERGY SOCIETY**, v. 1, 1994.

MUNEER, T.; YOUNES, S.; MUNAWWAR. Discourses on solar radiation modeling. **Renewable and Sustainable Energy**, New York, v. 11, p. 551-602, 2007.

OLIVEIRA, A. P., ESCOBEDO, J. F., MACHADO, A. J. A new shadow-ring device for measuring diffuse solar radiation at surface. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, Boston, v. 19, p. 698-708, 2002a.

OLIVEIRA, A. P., ESCOBEDO, J. F., MACHADO, A. J., SOARES, J. Correlation models of diffuse solar-radiation applied to the city of São Paulo, Brazil. **Applied Energy**, Oxford, v.71, p.59-73, 2002b.

ROBINSON, N.; STOCH, L. Sky Radiation Measurement and Corrections. **Journal of Applied Meteorology**, Boston, v. 3, n. 2, p. 179-181, abr. 1964. Disponível em: [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1964\)003%3C0179:srmac%3E2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1964)003%3C0179:srmac%3E2.0.co;2). Acesso em: 7 nov. 2022.

RODRÍGUEZ-MUÑOZ, J.M., MONETTA, A.ALONSO-SUÁREZ, R. et al. Correction methods for shadow-band diffuse irradiance measurements: assessing the impact of local adaptation. **Renewable Energy**, Oxford, v. 178, p. 830-844, 2021. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096014812100968X>>. Acesso em: 16 nov. 2021.

TIEGHI, C. P. **Radiação solar global em superfícies verticais: medidas e modelos de estimativa**. Botucatu- SP, 2018. 60 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2018.

TREGENZA, P. R. et al. **Guide to recommended practice of daylight measurement**. Vienna: **Cimmission Internationale de l'éclairage (CIE)**, 1994. Disponível em: <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:103820>. Acesso em: 16 nov. 2021.

WU, WEI, TANG, XIAOPINGLV, JIAKE et al. Potential of Bayesian additive regression trees for predicting daily global and diffuse solar radiation in arid and humid areas. **Renewable Energy**, Oxford, v. 177, p. 148-163, 2021. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148121007813>>. Acesso em: 16 nov. 2021.

CAPÍTULO 2

MEDIDAS DA RADIAÇÃO SOLAR DIFUSA EM SUPERFÍCIE VERTICAL AO NORTE EM BOTUCATU SP

2.1 INTRODUÇÃO

Em projetos para dimensionamento de centrais geradoras de energia solar ou para utilização em projetos menores, é necessário conhecer a sazonalidade dos níveis energéticos de radiação solar incidentes na região onde se pretende fazer o uso desta fonte de energia limpa e renovável, pois em cada região do planeta, a radiação solar apresenta diferentes níveis quantitativos de ganho energético (CUCUMO et al, 2006, p. 692; DAL PAI, 2005, p. 7; HALAWA; VAN HOOFF; SOEBARTO, 2014, p. 907; MOHAMMADI; KHORASANIZADEH, 2015, p. 504; SCOLAR, 2003, p. 5).

Em grandes cidades, painéis fotovoltaicos semitransparentes estão sendo instalados nas fachadas de prédios para aproveitar a radiação incidente, visando economizar gastos com energia elétrica. Nestes casos, é necessário conhecer a radiação solar incidente em superfície vertical para definir em qual fachada serão instalados os painéis fotovoltaicos (DÍEZ-MEDIAVILLA et al., 2019, p. 192; LIU et al., 2019, p. 1399). Por conta do alto custo de aquisição, manutenção e operação dos sensores de medidas solares, assim como dificuldades de calibração, não são corriqueiras medidas da radiação solar em planos inclinados em estações meteorológicas. Assim sendo, o potencial energético e térmico da radiação solar incidente nas fachadas verticais fica desconhecido.

Caracterizar a energia solar é uma tarefa complexa. A irradiação incidente em qualquer ponto da superfície da Terra é afetada por diversos fenômenos físicos, como a absorção e o espalhamento produzidos pelos gases da atmosfera, aerossóis ou partículas em suspensão (DAL PAI, 2005, p. 7). Por esta razão, a obtenção de medidas sistemáticas e confiáveis do potencial solar no nível da superfície é de fundamental importância. Em locais que não possuem dados da radiação solar em plano inclinado, é possível estimar a incidência solar utilizando modelos de estimativa. Muitos estudos ao redor do mundo foram feitos no intuito de estimar a irradiação solar em plano inclinado com base nas medidas da irradiação solar na horizontal, pois esta medida é mais comum nas estações meteorológicas (HAY, 1979, p. 301; KLUCHER, 1979, p. 111; LIU & JORDAN, 1963, p. 53; PEREZ et al., 1987, p. 221;

TEMPS & COULSON, 1977, p.179). Alguns modelos testados ajustam para Botucatu-SP, como os modelos anisotrópicos de Hay e Perez, porém, são complexos, com muitos termos. Neste sentido, existe a necessidade de desenvolver e validar modelos ou teorias que nos permitem estimar os valores de irradiância a partir de dados disponíveis, da forma mais simples e precisa possível.

Este trabalho tem como objetivos:

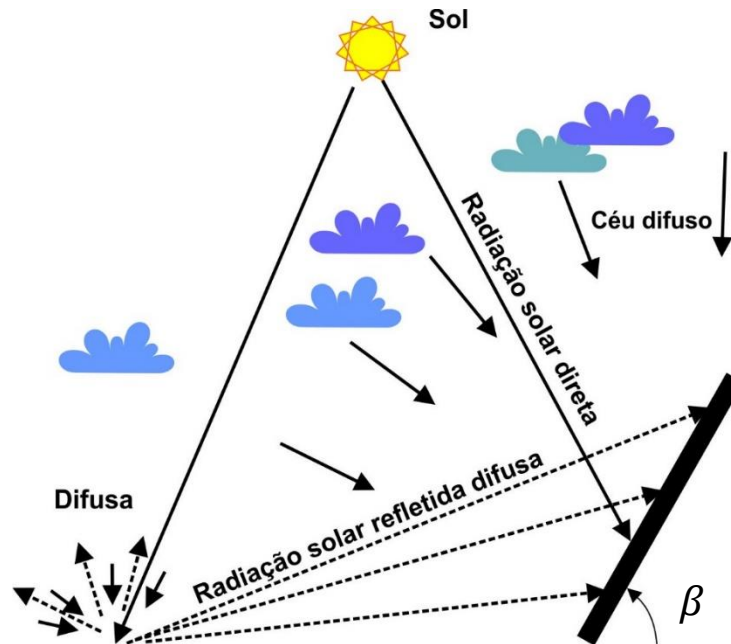
1. Medir e analisar descritivamente os dados da irradiação solar difusa em superfície horizontal e vertical orientada ao Norte geográfico medidos durante os anos 2019, 2020 e 2021 na estação de radiometria do Departamento de Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia da Faculdade de Ciências Agrônomicas da UNESP de Botucatu;
2. Avaliar a variação sazonal das radiações solares difusas em superfície horizontal e vertical para a região de Botucatu-SP, visando um melhor conhecimento desta fonte de energia limpa e renovável de energia.

2.2 REVISÃO DE LITERATURA

2.2.1 Componentes da radiação solar em superfícies inclinadas

A irradiação solar global em uma superfície horizontal é a intensidade energética instantânea incidente sobre determinado local e momento (em W/m^2). Ela é composta por duas frações: a irradiação solar direta, proveniente dos feixes de luz e a fração difusa da irradiação solar, oriunda da dispersão dos raios solares pelas partículas presentes na atmosfera, como gases, poeira, etc. (VAREJÃO SILVA, 2006, p. 206). Em superfícies inclinadas existe um adicional energético chamado radiação solar refletida, conforme é observado na Figura 1. Esta fração depende do tipo de solo (albedo) e varia ao longo do dia, devido à movimentação solar. A Figura 1 a seguir ilustra as componentes da radiação solar em superfície inclinada.

Figura 1 - Componentes da radiação solar em superfície inclinada



Fonte: Adaptado de IQBAL (1983, p. 304)

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 ($H_{\beta r}^d$) conforme equação 1.:

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

A fração direta da irradiação solar ($H_{\beta b}^d$) incidente em uma superfície inclinada (IQBAL, 1983, p. 306) pode ser calculada por meio da multiplicação do valor da irradiação direta projetada na horizontal (H_{bh}^d) e do fator de correção geométrico R_B , mostrado na equação 2:

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

Para calcular a incidência energética em qualquer ângulo de inclinação, adiciona-se a porção refletida da irradiação solar, proveniente da reflexão do solo (albedo) que atinge a superfície inclinada. O albedo varia de acordo com os componentes físicos (cor, rugosidade etc.) e do ângulo zenital (VAREJÃO SILVA, 2006, p. 222). A porção refletida ($H_{\beta r}^d$) incidente em uma superfície inclinada, presumindo que a reflexão causada pela superfície do solo seja isotrópica, onde o espalhamento da reflexão acontece de forma igual em todas as direções, 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; H_g^d : Irradiação global horizontal; β Ângulo de inclinação da superfície; O termo $[\frac{1}{2}(1 - \cos(\beta))]$ é a razão entre a irradiação incidente na superfície inclinada sobre a irradiação refletida pelo solo.

2.2.2 Irradiação solar global diária em superfícies inclinadas

Uma expressão para o valor diário com base em dias individuais pode ser escrita:

$$H_{\beta \gamma} = H_{b\beta \gamma} + H_{d\beta} \quad (4)$$

Onde:

$H_{b\beta \gamma}$: Radiação solar direta diária em uma superfície inclinada orientada em qualquer direção ($\text{MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$).

$H_{d\beta}$: Radiação solar difusa diária incidente em superfície inclinada ($\text{MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$).

2.2.3 Relação entre a radiação global em uma superfície inclinada e em superfície horizontal

Após calcular a insolação total em um plano inclinado, é útil determinar o efeito de inclinação, albedo e orientação por meio do cálculo do fator R ou $\bar{R}$, a seguir:

$$R = H_{\beta \gamma} / H \quad (5)$$

$$\bar{R} = \frac{\bar{H}_{\beta\gamma}}{\bar{H}} = \left(1 - \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}}\right) \bar{R}_b + \frac{\bar{H}_r + \bar{H}_s}{\bar{H}} \quad (6)$$

Onde:

$\bar{H}_{\beta\gamma}$: Radiação solar global diária em uma superfície inclinada orientada em qualquer direção ($\text{MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$).

$\bar{H}$: Radiação global diária em superfície horizontal ($\text{MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$).

$\bar{H}$: Média mensal da radiação global diária em superfície horizontal ($\text{MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$).

$\bar{H}_d$: Média mensal da radiação solar difusa diária em superfície horizontal ($\text{MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$).

$\bar{H}_r$: Média mensal da radiação solar refletida difusa em superfície inclinada ($\text{MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$).

$\bar{H}_s$: Média mensal da radiação solar difusa em superfície inclinada ($\text{MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$).

$\bar{R}_b$: Média mensal de R_b .

Em superfícies onde a inclinação é elevada, durante os meses de verão, o valor de $\bar{R}$ é menor que um. O fator $\bar{R}$ diminuirá ainda mais em baixas latitudes. Um aumento no albedo do solo aumenta substancialmente a radiação quando o ângulo de inclinação é alto. Em ângulos de inclinação baixos, o albedo do solo tem um efeito mínimo (IQBAL, 1983, p. 330).

2.2.4 Radiação solar refletida

Quando os raios solares incidem sobre uma superfície, dependendo do material, cor, etc., a energia pode ser parte absorvida, refletida e parte transmitida. As características de uma superfície ou de um material associado a essas três funções são denominadas absorvidade, refletividade e transmissividade. O total de energia incidente associada a essas propriedades é denominada absortância, refletância e transmitância. O termo “albedo” é comumente utilizado no lugar de “refletância”.

O conhecimento do valor do albedo é imprescindível na avaliação da insolação total incidente em uma construção ou em um coletor de energia solar. Também é necessário em estudos sobre o equilíbrio térmico na atmosfera (IQBAL, 1983, p. 303).

O conhecimento do valor do albedo é essencial na avaliação da insolação total incidente em uma construção ou em um coletor de energia solar porque o albedo representa a fração da radiação solar refletida pela superfície. Em outras palavras, o albedo indica a capacidade da superfície em refletir a radiação solar incidente em vez de absorvê-la.

Na avaliação da insolação incidente em uma construção ou coletor de energia solar, é importante considerar tanto a radiação solar direta quanto a difusa que atinge a superfície. Se a superfície tiver um albedo elevado, uma fração significativa da radiação solar incidente será refletida de volta para a atmosfera em vez de ser absorvida, o que reduz a quantidade de radiação solar disponível para aquecer o interior da construção ou gerar energia no coletor solar.

Por outro lado, se a superfície tiver um albedo baixo, ela absorverá uma fração maior da radiação solar incidente, aumentando assim a quantidade de radiação solar disponível para ser utilizada. Portanto, conhecer o valor do albedo é importante para avaliar o desempenho energético de construções e coletores solares, além de ser fundamental para o projeto e monitoramento desses sistemas.

A irradiância solar refletida avaliada depende fortemente do ambiente circundante, da estação do ano, das condições do céu e da posição do sol. Além disso, o albedo do ambiente circundante varia ao longo do dia e do ano. De modo predominante, isso é causado pela dinâmica da luminância do céu durante o dia devido ao movimento das nuvens, a alteração da posição do disco solar e variações na aparência dos arredores devido a mudanças sazonais, como vegetação ou ocorrência de cobertura de neve (HEIM; KNERA, 2021, p.1).

2.2.5 Anel de sombreamento para medir a radiação solar difusa em superfície vertical

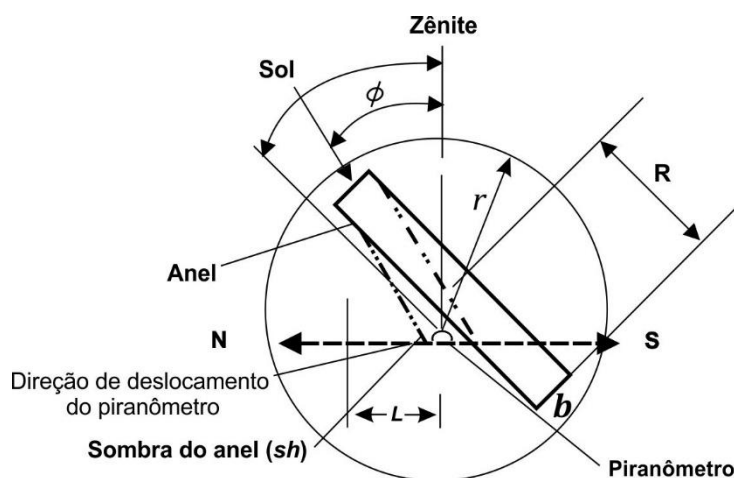
Além de realizar medições da porção difusa da radiação solar, anéis de sombreamento são usados como alternativa para obter a componente direta da radiação solar, pelo método da diferença entre medidas da radiação global e difusa. Dados sobre esta componente são importantes na área de conversão energética, para utilização da energia solar fotovoltaica. Por meio desta técnica, obtém-se a componente direta através do método da diferença, onde radiação solar difusa e global são medidas e após isso, a porção direta é obtida subtraindo a componente difusa da radiação solar global. Por meio desta técnica, conseguimos os dados da

radiação solar direta sem a necessidade de adquirir um pireliômetro, que representa um custo elevado para uma estação meteorológica (DAL PAI, 2005, p. 14).

Para projetar um anel de sombreamento adequado, deve-se analisar a trajetória do sol ao longo do ano, que depende da localização geográfica e da época do ano. Na literatura existem alguns tipos de montagem de anel de sombreamento para medir a radiação solar difusa, porém estes foram inicialmente desenvolvidos para medir a radiação difusa em superfície horizontal. As montagens mais difundidas são as de Robinson e Stoch (1964), Drummond (1956) e MEO Melo-Escobedo (1993). Nas montagens do tipo Robinson e Stoch (1964) e Drummond (1956), o piranômetro se mantém fixo enquanto o anel se desloca no sentido Norte-Sul para manter na sombra do anel o piranômetro ao longo do ano, acompanhando a variação da movimentação sazonal dos raios solares ocasionada pela declinação solar (DAL PAI, 2005, p. 15; DRUMMOND, 1956, p. 414; MELO & ESCOBEDO, 1994, p. 1).

Na montagem do tipo MEO, o anel se mantém fixo inclinado em um ângulo igual à latitude local e o sensor do piranômetro é deslocado horizontalmente na direção norte-sul. A Figura 2 mostra a representação esquemática do dispositivo de anel de sombra do tipo MEO em superfície horizontal. Onde b é a largura do anel, r é o raio da esfera celeste, L é a distância entre o sensor (piranômetro) e o anel de sombreamento, R é o raio do anel, ϕ é a latitude local, β é o ângulo de inclinação da superfície, S é a direção Sul e N a direção Norte.

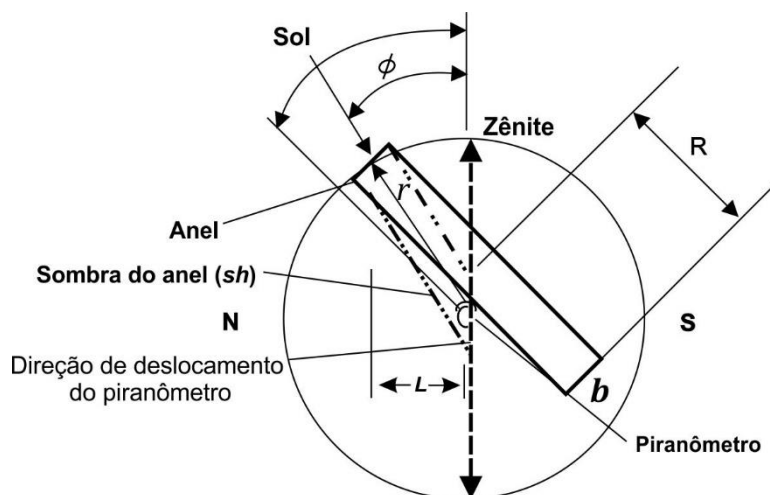
Figura 2 - Representação esquemática do piranômetro sobre anel de sombreamento do tipo MEO em superfície horizontal



Fonte: Adaptado de CHAIYAPINUNT et al. (2016, p. 631)

Neste estudo, foi adaptado o anel de sombreamento do tipo Melo-Escobedo-Oliveira (MEO) para medir o incidente de radiação solar difusa em uma superfície vertical orientada para o Norte. A estrutura do anel de sombreamento, que é feita em ferro, é composta de um anel de sombreamento, uma placa de base em superfície vertical para fixação do piranômetro. A de base deve possuir um controle deslizante para deslocar o piranômetro manualmente na direção vertical, para cima e para baixo, dependendo da época do ano. O anel deve ser instalado com um ângulo inclinado igual à latitude local ($22,85^\circ$ para Botucatu-SP). O controle deslizante deve ser instalado deslocado do centro do suporte para que o piranômetro fique no meio da sombra do anel. As medidas do anel são: raio 40 cm e largura 10 cm. O anel é pintado de preto fosco na parte interna para reduzir a radiação refletida no piranômetro. Na parte externa do anel, recomenda-se pintar de branco para refletir a radiação direta. A largura do anel deve ser igual ou maior que largura do piranômetro, para não precisar ajustar o piranômetro em curtos períodos. A Figura 3 mostra a representação esquemática do anel de sombreamento em superfície vertical.

Figura 3 - Representação esquemática do anel de sombreamento do tipo MEO em superfície vertical



Fonte: Do autor.

A Figura 4 mostra o piranômetro em superfície vertical ao Norte sob anel de sombreamento MEO medindo a irradiação solar difusa.

Figura 4 - Piranômetro Eppley 8-48 em superfície vertical ao Norte sob anel de sombreamento MEO



Fonte: Do autor.

2.3 MATERIAL E MÉTODOS

2.3.1 Caracterização do Clima Local

Este estudo foi realizado utilizando medidas da irradiação solar difusa em planos horizontal e vertical orientado ao Norte geográfico, situado na estação de radiometria do Departamento de Engenharia de Bioprocessos da Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP de Botucatu (latitude 22° 54' S, longitude 48° 27' O e altitude 716 m). As medidas foram realizadas no período de 2019, 2020 e 2021. A cidade de Botucatu possui 148.130 habitantes, situada próxima à 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 do tipo Cwa, que corresponde a um clima subtropical úmido. Durante o verão, o clima é quente, úmido e chuvoso, enquanto o inverno apresenta temperaturas amenas e seco. Os valores de temperatura e umidade relativa do ar variam de acordo com as mudanças astronômicas, sendo que os valores máximos são registrados em fevereiro (23,12 °C e 78,25%, respectivamente) e os valores mínimos de temperatura são observados em

julho (17,10 °C) e de umidade relativa em agosto (63,97%). A estação chuvosa ocorre durante o verão e a primavera, acompanhada de grande nebulosidade. Cerca de 80% da precipitação anual concentra-se nesse período, com o pico máximo de chuvas em janeiro (246,2 mm). Durante o inverno e o outono, a média de precipitação mensal é inferior a 100 mm, sendo que o valor mínimo é registrado em agosto (36,1 mm) (TIEGHI, 2018, p.25).

2.3.2 Aquisição de dados

Os valores das irradiâncias solares foram monitorados por um sistema de aquisição de dados automático modelo CR3000 da Campbell Scientific. Para a aquisição dos dados das irradiâncias solares diárias, foram calculados os valores médios a cada minuto e armazenados no formato W/m^2 .

A irradiância solar difusa em superfície horizontal foi medida com o piranômetro Eppley PSP. A irradiância solar difusa em superfície vertical foi medida com o piranômetro Eppley 8-48. Para medir a irradiância difusa em superfície vertical, no intuito de aumentar os ganhos energéticos durante o período de inverno, o piranômetro foi instalado em plano inclinado à 90° com a face voltada para o Norte geográfico, sob um anel de sombreamento do tipo MEO.

O piranômetro foi fixado em uma base móvel de ferro no sentido vertical ao Norte. O Anel de sombreamento é ajustável no sentido vertical, para ajustes ao longo do ano, devido à declinação solar. O Anel ficou inclinado na latitude local, à 22° durante todo o experimento, sendo ajustado no sentido vertical para cima durante os meses de verão e no sentido vertical para baixo nos períodos de inverno, por conta da variação da declinação solar ao longo do ano.

Os valores das irradiâncias solares difusas nas superfícies horizontal e vertical foram integrados para as partições tempo diárias, transformando-se em irradiações ao converter W/m^2 para MJ/m^2 . Os indicadores estatísticos foram feitos no *Software* RStudio e no *software Origin 6.0*.

2.3.3 Controle de qualidade (validação de medidas)

O procedimento de controle de qualidade foi aplicado para avaliar a confiabilidade das medidas, uma vez que podem ter sido afetadas por problemas causados pela instrumentação (efeito do cosseno, seletividade espectral e desalinhamento no anel de sombreamento) ou por eventos externos (excremento de aves, orvalho sobre o sensor e rompimento do cabeamento) no local de medição (MUNEER; YOUNES; MUNAWWAR, 2007, p. 554). Portanto, foram impostas condições para identificar e descartar valores incorretos (acima ou abaixo do esperado), na partição temporal instantânea (medidas coletadas a cada 1 minuto), horária e diária, para cada componente medidas (Tabela 1): irradiância global em superfícies horizontal e vertical, difusa em superfícies horizontal e vertical, direta em superfície horizontal e refletida (albedo).

Tabela 1 - Condições de avaliação de medidas do procedimento de controle de qualidade

Tempo	Condição de avaliação	Medida afetada
INSTANTÂNEA (1ª ETAPA) LIMITES FISICAMENTE POSSÍVEIS	$E \leq 5^\circ$	GHI, GVI, DHI, DVI, BHI, RHI
	$0 < GHI \leq (EHI * 1.20)$	GHI
	$0 < DHI \leq (EHI * 0.80)$	DHI
	$0 \leq BHI \leq EHI$	BHI
	$0 \leq RHI \leq (GHI * 0.50)$	BHI
	$0 < GVI$	GVI
	$0 < DVI$	DVI
	$(DHI / GHI) \leq 1.05$	GHI, DHI
	Quando $E > 15^\circ$ e $GHI > 50 \text{ W/m}^2$	GHI, DHI
	$(DHI / GHI) \leq 1.10$	GHI, DHI
INSTANTÂNEA (2ª ETAPA) COMPARAÇÃO ENTRE COMPONENTES	Quando $E \leq 15^\circ$ e $GHI > 50 \text{ W/m}^2$	GVI, DVI
	$(DVI / GVI) \leq 1.05$	GVI, DVI
	Quando $E > 15^\circ$ e $GVI > 50 \text{ W/m}^2$	GVI, DVI
	$(DVI / GVI) \leq 1.10$	GVI, DVI
	Quando $E \leq 15^\circ$ e $GVI > 50 \text{ W/m}^2$	GVI, DVI
HORÁRIA LIMITES FISICAMENTE POSSÍVEIS	$0 < GHI \leq EHI$	GHI
	$0 < DHI < GHI$	DHI
	$0 < BHI < GHI$	BHI
	$0 < RHI < GHI$	RHI
	$0 < GVI \leq EHI$	GVI
	$0 < DVI < GVI$	GVI
DIÁRIA	$0 < GHI \leq EHI$	GHI
	$0 < DHI < GHI$	DHI

LIMITES	$0 < \text{BHI} < \text{GHI}$	BHI
FISICAMENTE	$0 < \text{RHI} < \text{GHI}$	RHI
POSSÍVEIS	$0 < \text{GVI} \leq \text{EHI}$	GVI
	$0 < \text{DVI} < \text{GVI}$	GVI

Fonte: Do autor.

Legenda: **EHI** = Extraterrestrial Horizontal Irradiation/Irradiance (Extraterrestre); **GHI** = Global Horizontal Irradiation/Irradiance (Global Horizontal); **GVI** = Global Vertical Irradiation/Irradiance (Global Vertical); **DHI** = Diffuse Horizontal Irradiation/Irradiance (Difusa Horizontal); **DVI** = Diffuse Vertical Irradiation/Irradiance (Difusa Vertical); **BHI** = Direct-Beam Horizontal Irradiation/Irradiance (Direta Horizontal); **RHI** = Reflected Horizontal Irradiation/Irradiance (Refletida); **E** = Solar Elevation (Elevação Solar).

O efeito do cosseno, ângulo em que a radiação solar atinge o sensor, é o problema mais recorrente em piranômetros (MUNEER; YOUNES; MUNAWWAR, 2007, p. 554). Pois quanto mais agudo for, geralmente ao nascer e pôr do sol, maior é a inexatidão do valor mensurado. Neste sentido, medidas adquiridas em elevação solar menores que 5° (momentos após o nascer e antes do pôr do sol) foram descartadas para este estudo. Posteriormente, uma série de avaliações foi aplicada para identificar medidas errôneas, permitindo descartar os valores rejeitados pelas condições impostas. O procedimento da Comissão Internacional de Iluminação - CIE (TREGENZA et al., 1994) foi utilizado para identificar medidas abaixo ou acima do limite fisicamente possível na partição temporal instantânea (Tabela 2), horária (Tabela 3) e diária (Tabela 4), tal que o procedimento da Baseline Surface Radiation Network - BSRN (LONG; DUTTON, 2002, p. 1) foi aplicado para comparar as componentes medidas na partição temporal instantânea.

Tabela 2 - Resultado da avaliação das medidas em partição temporal instantânea

Irradiância	Medidas	Medidas restantes após	
	Brutas	1ª etapa	2ª etapa
GHI	596.662	554316	512037
GVI	599.414	559463	539304
DHI	589.724	549743	507464
DVI	600.320	548691	528532
BHI	595.038	496043	496043

RHI	608.748	544.699	544699
-----	---------	---------	--------

Fonte: Do autor.

Legenda: **GHI** = Global Horizontal Irradiance (Global Horizontal); **GVI** = Global Vertical Irradiance (Global Vertical); **DHI** = Diffuse Horizontal Irradiance (Difusa Horizontal); **DVI** = Diffuse Vertical Irradiance (Difusa Vertical); **BHI** = Direct-Beam Horizontal Irradiance (Direta Horizontal); **RHI** = Reflected Horizontal Irradiance (Refletida).

Após a aplicação do procedimento de avaliação das medições em partição temporal instantânea os valores foram integrados para se obter as medidas horárias, que também passaram pelo processo de controle de qualidade (Tabela 3). Seguindo o mesmo raciocínio as medidas que não atenderam a condição de avaliação foram descartadas.

Tabela 3 - Resultado da avaliação das medidas em partição temporal horária

Irradiância	Medidas	
	Antes da avaliação	Após avaliação
GHI	10339	10.339
GVI	10125	9.406
DHI	10246	9.395
DVI	10226	9701
BHI	9965	9270
RHI	10391	10146

Fonte: Do autor.

Legenda: **GHI** = Global Horizontal Irradiation (Global Horizontal); **GVI** = Global Vertical Irradiation (Global Vertical); **DHI** = Diffuse Horizontal Irradiation (Difusa Horizontal); **DVI** = Diffuse Vertical Irradiation (Difusa Vertical); **BHI** = Direct-Beam Horizontal Irradiation (Direta Horizontal); **RHI** = Reflected Horizontal Irradiation (Refletida).

Por fim, após a realização da avaliação dos valores horários as medidas foram somadas para o período completo de um dia, gerando o arquivo final com as medidas em partição temporal diária, onde os valores também passaram por um processo de avaliação de sua qualidade, de forma que ao serem rejeitados pelas condições impostas eram descartados do conjunto final de medições (Tabela 4).

Tabela 4 - Resultado da avaliação das medidas em partição temporal diária

Irradiância	Medidas	
	Antes da avaliação	Após avaliação
GHI	882	882
GVI	854	854
DHI	872	872
DVI	868	861
BHI	875	863
RHI	883	871

Fonte: Do autor.

Legenda: **GHI** = Global Horizontal Irradiation (Global Horizontal); **GVI** = Global Vertical Irradiation (Global Vertical); **DHI** = Diffuse Horizontal Irradiation (Difusa Horizontal); **DVI** = Diffuse Vertical Irradiation (Difusa Vertical); **BHI** = Direct-Beam Horizontal Irradiation (Direta Horizontal); **RHI** = Reflected Horizontal Irradiation (Refletida).

2.3.4 Indicativos estatísticos

Para obter a evolução temporal das irradiações solares difusas mensais, foram adotadas medidas estatísticas de posição (Média (μ)), de dispersão em torno da média (Desvio-padrão (σ)), teste de hipóteses para comparar médias para amostras independentes (Teste t (T_{calc})) e para determinar o afastamento da média que os dados de um conjunto analisado apresentam (Variância (σ^2)) dadas pelas equações (7), (8), (9) e (10) além dos valores máximos, mínimos e desvio-padrão.

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n xi}{N} \quad (7)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (xi - \mu)^2}{N}} \quad (8)$$

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

$$T_{calc} = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2)}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}} \sim t_{(v)} \quad (9)$$

Sendo: S : Desvio-padrão de cada amostra, n : Tamanho da amostra, x : Média de cada amostra, v : Graus de liberdade, calculado a partir da equação 10, à seguir:

$$\text{sendo } v = \frac{\left(\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}\right)^2}{\frac{1}{n_1-1}\left(\frac{s_1^2}{n_1}\right)^2 + \frac{1}{n_2-1}\left(\frac{s_2^2}{n_2}\right)^2}$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \mu)^2 \quad (10)$$

Onde y_i é a população.

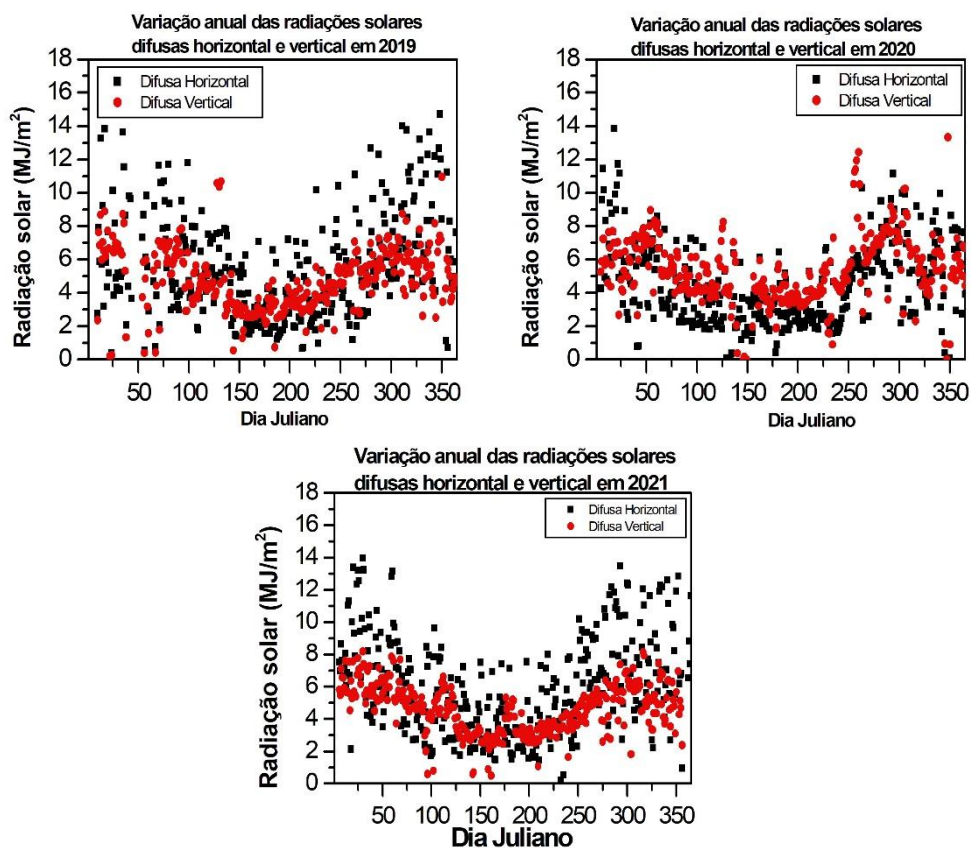
2.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.4.1 Evolução temporal das medidas da radiação solar difusa em superfícies horizontal e vertical

Nesta seção serão mostradas as evoluções temporais das radiações solares difusas nas superfícies horizontal e vertical orientada para o Norte durante os anos de 2019, 2020 e 2021. A Figura 5 mostra a variação anual da radiação solar difusa diária nas superfícies horizontal e vertical ao longo dos anos de 2019, 2020 e 2021.

A dispersão dos pontos deve-se à dinâmica atmosférica, que altera de acordo com a época do ano. Durante o verão a nebulosidade aumenta, apresentando maior dispersão dos pontos. Para as duas medições, o comportamento é similar ao longo dos anos. Para a radiação solar difusa em superfície vertical, durante o verão, além das condições atmosféricas serem mais complexas, devido à alta nebulosidade, o piranômetro posicionado na superfície vertical ao Norte não capta a incidência direta da irradiação. Neste período não há incidência de raios solares na superfície na face Norte por conta da declinação solar, que fica mais ao Sul nesta época do ano.

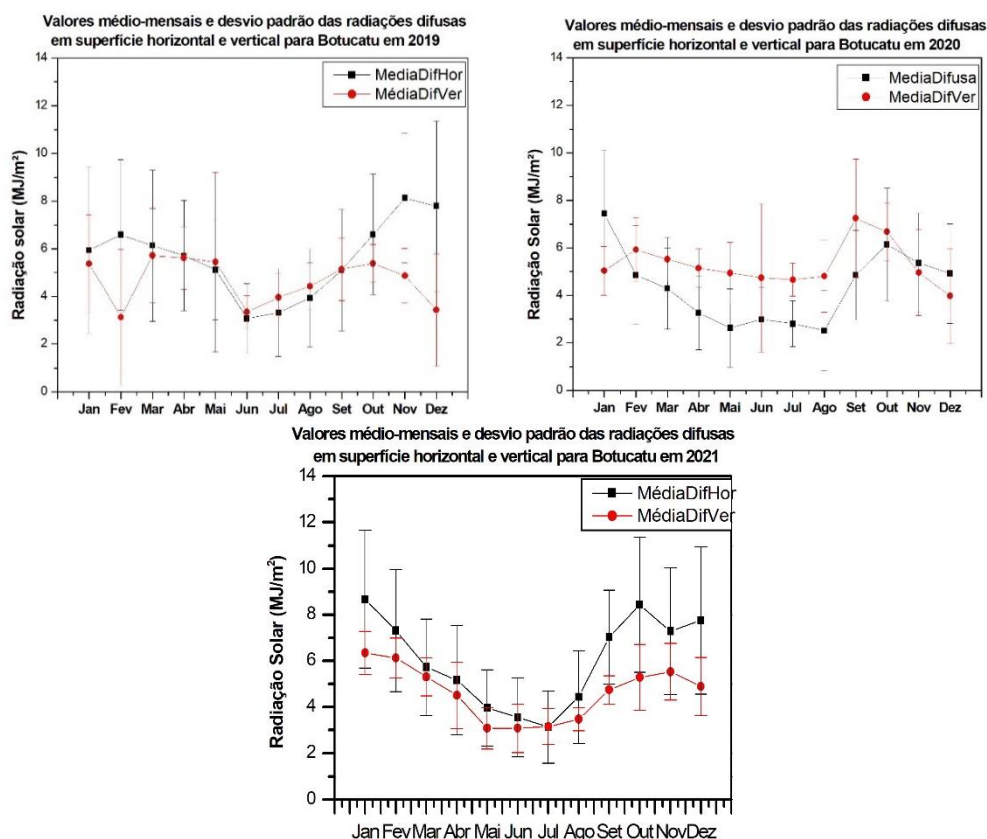
Figura 5 - Acumulados diários de irradiância difusa horizontal e vertical nos anos de 2019, 2020 e 2021 para Botucatu-SP (em MJ/m²)



Fonte: Do autor.

Com o intuito de facilitar aplicações que requerem análises anuais de radiação solar, foram gerados valores médios mensais, juntamente com seus respectivos desvios-padrão, a partir de dados diários de irradiações solares difusas em superfícies horizontais e verticais. Na Figura 6, é possível observar os valores médios mensais e desvios-padrão das radiações solares difusas horizontal e vertical nos anos de 2019, 2020 e 2021, na cidade de Botucatu - SP.

Figura 6 – Valores médio mensais e desvio padrão das radiações solares difusa horizontal e vertical nos anos de 2019, 2020 e 2021 para Botucatu – SP



Fonte: Do Autor.

Além das obtenções dos valores médio-mensais e desvios-padrão, também foram realizados cálculos das variâncias e teste T para amostras independentes. Os resultados obtidos para o ano de 2019 estão apresentados na Tabela 5, para o ano de 2020 estão na tabela 6 e para 2021, na tabela 7.

Na tabela 5, em 2019, a radiação solar difusa horizontal é, em média, 25% maior que em superfície vertical, comparando-se com a radiação difusa em superfície horizontal. Os valores máximos se encontram no final do ano, do período do verão. Para o mesmo período, os valores de desvio-padrão também são maiores devido à nebulosidade atmosférica que encontra superior aos demais períodos ou mais intenso neste período.

Já para a radiação difusa em superfície vertical ao Norte, há uma menor diferença entre os meses no decorrer do ano. Os valores máximos se encontram em março e outubro, enquanto os valores mínimos medidos foram em fevereiro e dezembro. Em fevereiro deste ano, por algum problema técnico, há uma falta de dados da radiação solar em superfície vertical, ocasionando baixos valores medidos

neste mês. Em dezembro, devido à declinação solar estar mais ao Sul, o sensor posicionado ao Norte não recebe incidência de raios solares diretos, ocasionando a diminuição da incidência difusa da radiação solar neste período.

O teste T de significância a um nível alfa de 0,05, mostrou que nos meses novembro e dezembro existe uma diferença significativa entre as médias. Já para os outros meses do ano, não é possível concluir que existe uma diferença significativa entre as médias, pois os valores de p foram maiores que alfa. Para o teste F das variâncias entre as duas medidas, o maior valor de desvios em relação às médias foi observado em fevereiro.

Tabela 5 - Médias diárias (desvio-padrão) medidas diárias das radiações solares difusa horizontal e vertical (MJ/m²) no ano de 2019 em Botucatu – SP

Mês	Radiação Difusa		Valor p	
	Média (DP) Horizontal	Média (DP) Vertical	Teste F para Variâncias	Teste T Para médias
Jan	5,94 (3,50)	5,37 (2.03)	0,0192	0,5256
Fev	6,58 (3,15)	3,12 (2.85)	0,2862	0,0351
Mar	6,13 (3,17)	5,71 (1.98)	0,0199	0,5615
Abr	5,71 (2,31)	5,62 (1.31)	0,0032	0,8485
Mai	5,12 (2,10)	5,44 (3.77)	0,0059	0,7141
Jun	3,07 (1,45)	3,34 (0.68)	0,0001	0,3504
Jul	3,32 (1,83)	3,95 (0.99)	0,0011	0,0934
Ago	3,93 (2,07)	4,42 (0.97)	< 0,0001	0,2352
Set	5,09 (2,54)	5,14 (1.31)	0,0006	0,9277
Out	6,60 (2,53)	5,38 (0.79)	< 0,0001	0,0144
Nov	8,13 (2,72)	4,86 (1.14)	< 0,0001	< 0,0001
Dez	7,79 (3,57)	3,43 (2.35)	0,0476	< 0,0001

Fonte. Do autor.

A Tabela 6 mostra os valores médio mensais, desvio padrão, valores de P e Variância das radiações solares difusa horizontal e vertical no ano de 2020 para Botucatu – SP. Ao comparar as medidas da radiação difusa horizontal entre os anos de 2019, 2020 e 2021, foi percebido uma falta de ajuste do sensor ao longo do ano de 2019, pois foram verificadas que as medidas das radiações global e difusa em superfície horizontal nos dados instantâneos estavam iguais em vários dias do ano.

Para os anos de 2020 e 2021, houve um notável aumento na precisão das medidas da radiação difusa em superfície horizontal, resultando em um melhor desempenho dos dados coletados. Essas medidas apresentaram variações

sazonais, com valores mais elevados durante o verão e mais baixos durante o inverno.

Observando as medidas instantâneas da radiação solar difusa em superfície vertical, foi notado que em alguns dias de setembro e outubro de 2020 houve falha no ajuste do sensor, pois as medidas da radiação solar vertical global e difusa estavam iguais em vários dias do mês, justificando a diferença entre 2019 e 2020 e 2021.

No ano de 2020, a intensidade média de radiação difusa na superfície vertical foi cerca de 18% maior do que na superfície horizontal. Os maiores desvios-padrão foram observados nas medições de radiação difusa horizontal, especialmente durante os meses de alta nebulosidade.

Os resultados apresentados com o teste F para variâncias mostraram que apenas nos meses de outubro, novembro e dezembro não é possível concluir que existe uma diferença significativa entre as médias, onde os valores de p foram maiores que o nível de significância, 0,05. Já para o resto do ano, os valores de p são menores que o nível alfa, mostrando que há uma diferença significativa entre as médias medidas. No teste F para variâncias, apenas em janeiro pode-se rejeitar a hipótese nula.

Tabela 6 – Médias diárias (desvio-padrão) medidas diárias das radiações solares difusa horizontal e vertical no ano de 2020 em Botucatu – SP

Mês	Radiação Difusa		Valor p	
	Média (DP) Horizontal	Média (DP) Vertical	Teste F para Variâncias	Teste T Para médias
Jan	7.44 (2.67)	5.03 (1.03)	< 0.0001	< 0.0001
Fev	4.85 (2.07)	5.92 (1.35)	0.03173	0.02778
Mar	4.29 (1.71)	5.51 (0.92)	0.0011	0.0008
Abr	3.25 (1.55)	5.14 (0.80)	0.0006	< 0.0001
Mai	2.62 (1.64)	4.93 (1.28)	0.0018	0.0012
Jun	2.98 (1.35)	4.74 (3.11)	0.7921	< 0.0001
Jul	2.79 (0.96)	4.65 (0.69)	0.0871	< 0.0001
Ago	2.51 (1.68)	4.80 (1.51)	0.5588	< 0.0001
Set	4.84 (1.88)	7.24 (2.49)	0.1329	< 0.0001
Out	6.13 (2.38)	6.67 (1.21)	0.0003	0.2703
Nov	5.36 (2.09)	4.96 (1.80)	0.4374	0.4387
Dez	4.91 (2.09)	3.97 (2.00)	0.0149	0.1736

Fonte: Do autor.

No ano de 2021, em média, os valores da radiação difusa horizontal foram 30% maiores do que na superfície vertical.

Os resultados apresentados com o teste t mostraram que nos meses de setembro e outubro existe uma diferença significativa entre as médias. Para o restante do ano, os valores de P são maiores que o nível alfa, mostrando que há uma diferença significativa entre as médias medidas.

No teste F para variâncias, durante 7 meses do ano (Fev, Mar, Jul, Ago, Set, Out e Nov), os valores globais foram menores que o nível de significância (0,05), podendo rejeitar a hipótese nula.

Tabela 7 – Médias diárias (desvio-padrão) medidas diárias das radiações solares difusa horizontal e vertical no ano de 2021 em Botucatu – SP

Mês	Radiação Difusa		Valor p	
	Média (DP) Horizontal	Média (DP) Vertical	Teste F para Variâncias	Teste T Para médias
Jan	8,87 (2,98)	6,35 (0,93)	0,2089	0,0002
Fev	7,32 (2,65)	6,13 (0,86)	< 0,0001	0,0222
Mar	5,73 (2,09)	5,31 (0,82)	< 0,0001	0,1805
Abr	5,17 (2,37)	4,51 (1,44)	0,0068	0,2089
Mai	3,97 (1,65)	3,08 (0,9)	0,0082	0,0145
Jun	3,55 (1,71)	3,08 (1,06)	0,0093	0,108
Jul	3,14 (1,56)	3,15 (0,78)	0,0017	0,5035
Ago	4,44 (2,01)	3,48 (0,51)	< 0,0001	0,0558
Set	7,03 (2,04)	4,75 (0,61)	< 0,0001	< 0,0001
Out	8,44 (2,93)	5,29 (1,42)	0,0001	< 0,0001
Nov	7,29 (2,74)	5,53 (1,23)	< 0,0001	0,0020
Dez	7,76 (3,2)	4,89 (1,26)	0,2506	0,0053

Fonte. Do autor.

Na Tailândia, Chaiyapinunt et al, 2016 desenvolveram um anel de sombreamento para medir a radiação solar difusa em superfície vertical ao Oeste. Neste estudo, utilizaram o valor da refletância do solo (albedo) de 0,05, pois o estudo foi realizado em um prédio, a 1,80 m acima do solo, em uma varanda. Já neste estudo, os dados foram coletados na grama, sendo assim, o valor do albedo utilizado foi de 0,23. Porém, Chaiyapinunt et al, 2016, obtiveram as medidas de radiação solar difusa apenas pela manhã, pois, durante a tarde o sensor mediu a radiação solar global. O fator de correção utilizado foi o mesmo para ambos os estudos.

Neste estudo na Tailândia, em seus resultados, a concordância entre a radiação solar difusa e a radiação solar global durante o período da manhã foi de acordo com o esperado, estando dentro da incerteza estimada.

A Figura 7 mostra os Box Plots da variação anual das radiações solares difusas em superfície horizontal e vertical ao Norte durante os anos de 2019, 2020 e 2021.

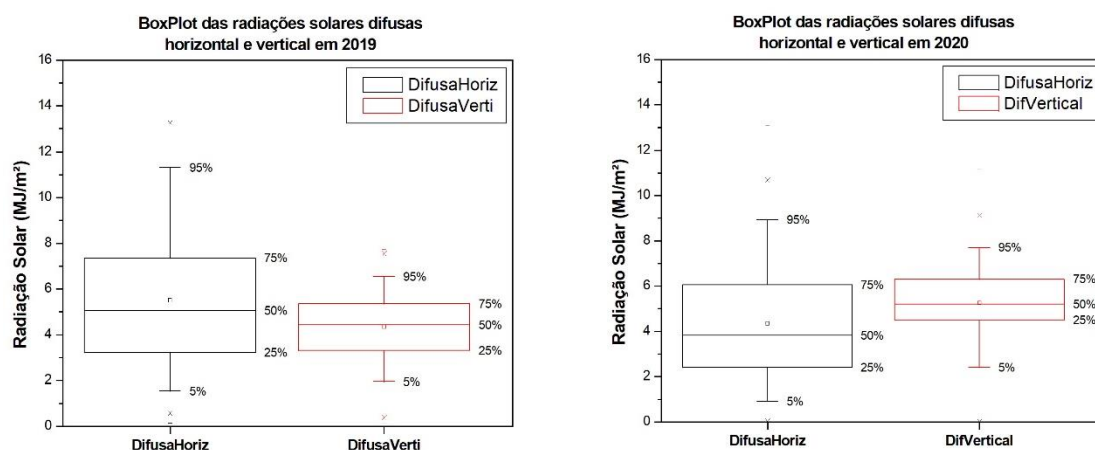
Para a radiação difusa em superfície horizontal, houve uma diferença entre os dois anos pela falta de ajuste do sensor no ano de 2019. Os valores medianos foram de 5 MJ/m² em 2019 e de 4 MJ/m² em 2020. Valores médios de 5 MJ/m² em 2019 e 4,3 em 2020. Em 2019, até 75% dos dados foram de 7,2 MJ/m². Em 2020, até 75% dos dados da difusa horizontal foram de 6 MJ/m².

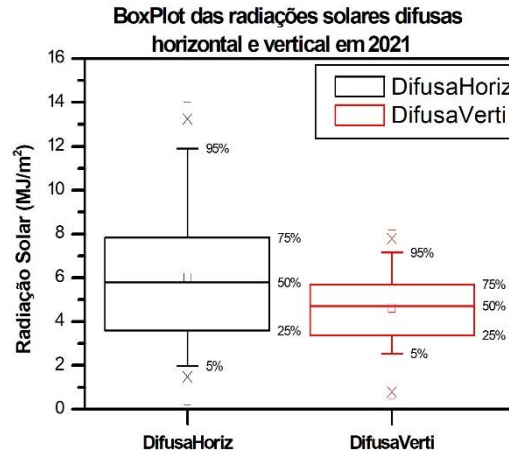
Para a radiação difusa em superfície vertical, a variação mostrou-se menor que em superfície horizontal nos dois anos. Em 2019, os valores médios e medianos foram iguais, de 4,2 MJ/m². Até 75% das medidas foram de 5,2 MJ/m². Em 2020, as médias e medianas aumentaram para 5 MJ/m². Até 75% dos dados medidos foram de 6,2 MJ/m².

Em 2021, os dados em superfície horizontal tiveram um padrão similar ao ano de 2019, com uma maior variação das medidas.

Para obter mais informações sobre o padrão comportamental anual da geração difusa da radiação solar, recomenda-se dar continuidade das medições, podendo fornecer mais informações sobre as diferenças observadas entre os 3 anos medidos.

Figura 7 – Box Plot da variação anual das radiações solares difusas em superfície horizontal e vertical ao Norte durante os anos de 2019, 2020 e 2021



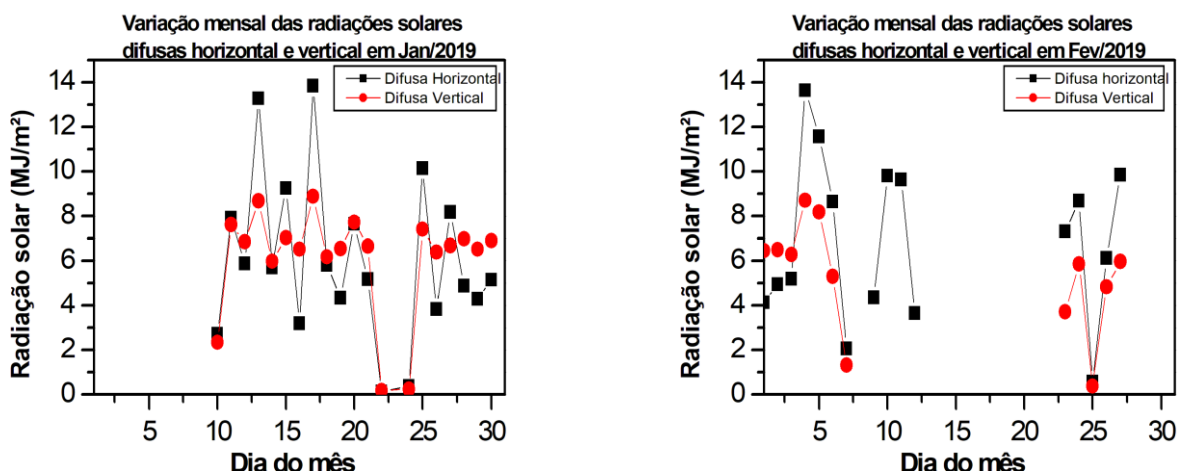


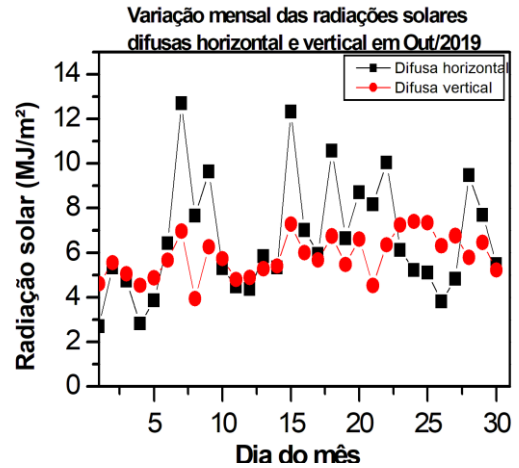
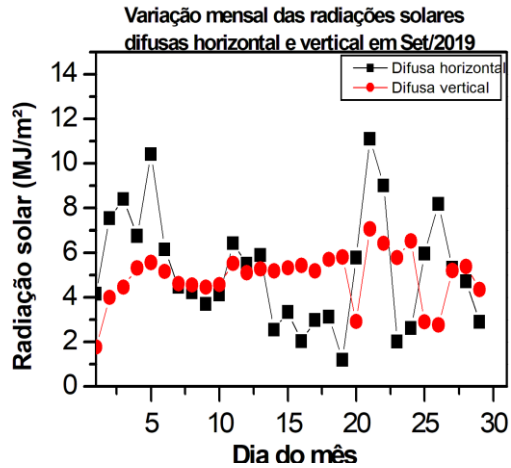
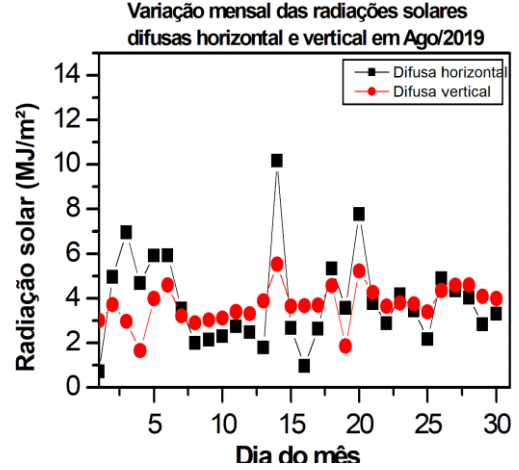
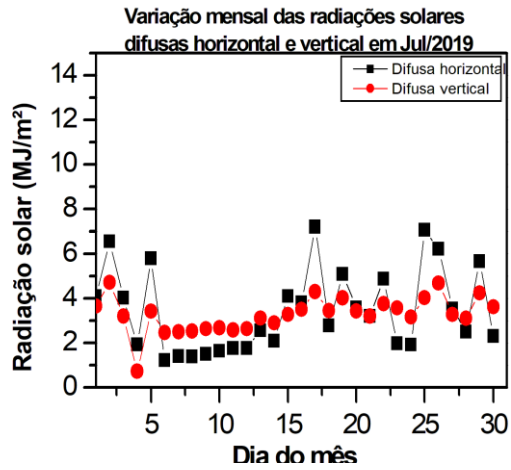
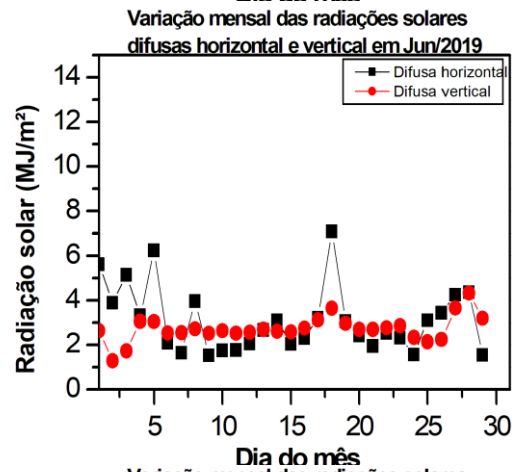
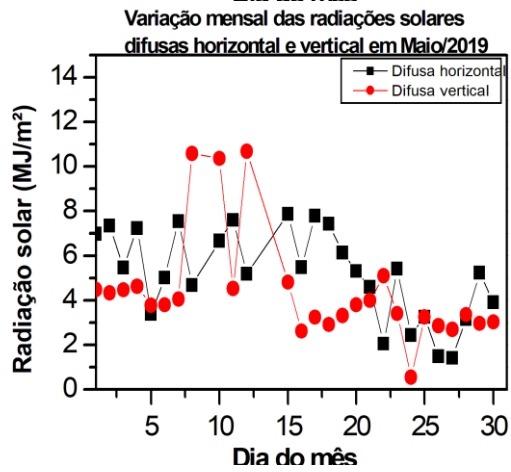
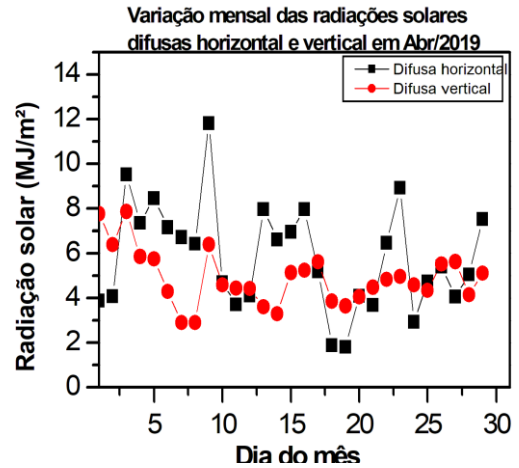
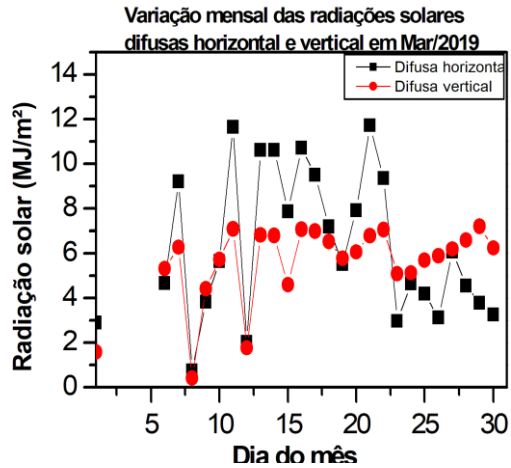
Fonte: Do autor.

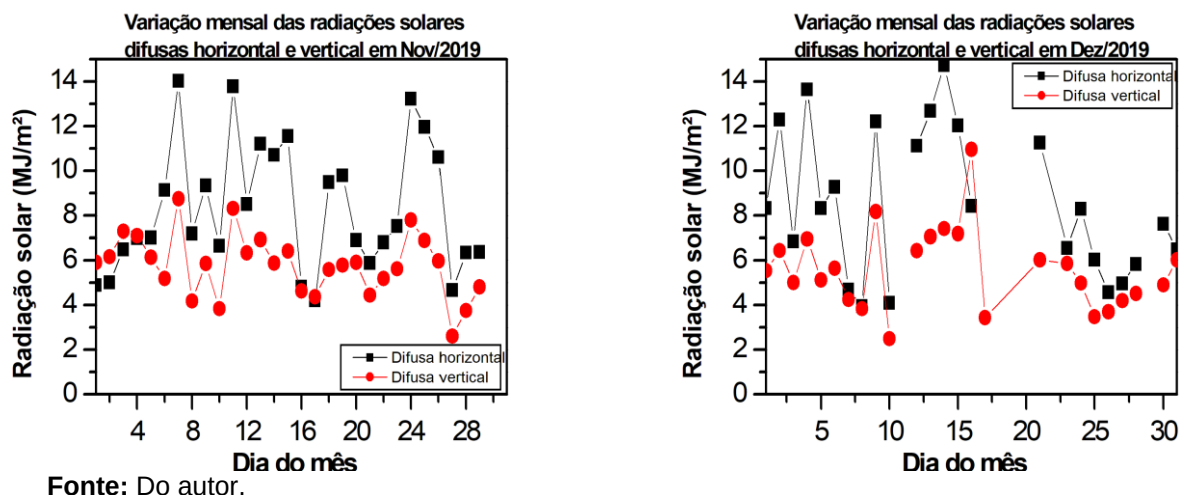
No intuito de verificar a variação mensal das radiações solares difusa horizontal e vertical ao Norte, a Figura 8 mostra a variação mensal da radiação solar difusa nas superfícies horizontal e vertical, nos meses de janeiro a dezembro de 2019 para Botucatu-SP.

Em janeiro e fevereiro de 2019 houve falta de dados, ocasionando poucas medidas diárias para as duas medidas. Para os outros meses, percebe-se que há uma diferença visível entre as medidas, porém, nos meses de inverno as medidas são semelhantes. Neste período há pouca nebulosidade, período em que a irradiação solar é, em geral, anisotrópica, causando menor dispersão nos dados medidos de radiação solar difusa.

Figura 8 - Evolução mensal das radiações difusas horizontal e vertical para os meses de janeiro a dezembro de 2019 para Botucatu-SP (em MJ/m²)





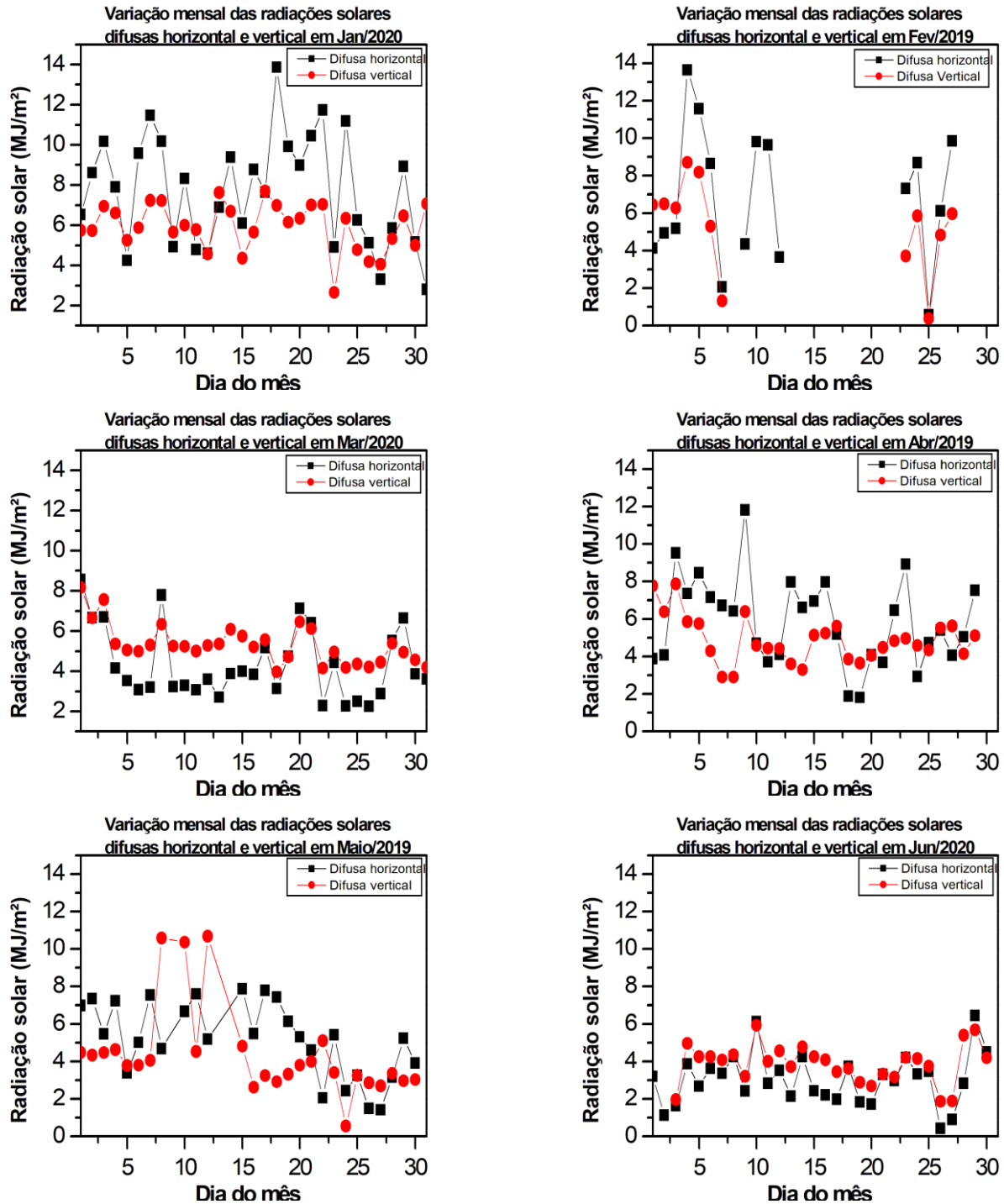


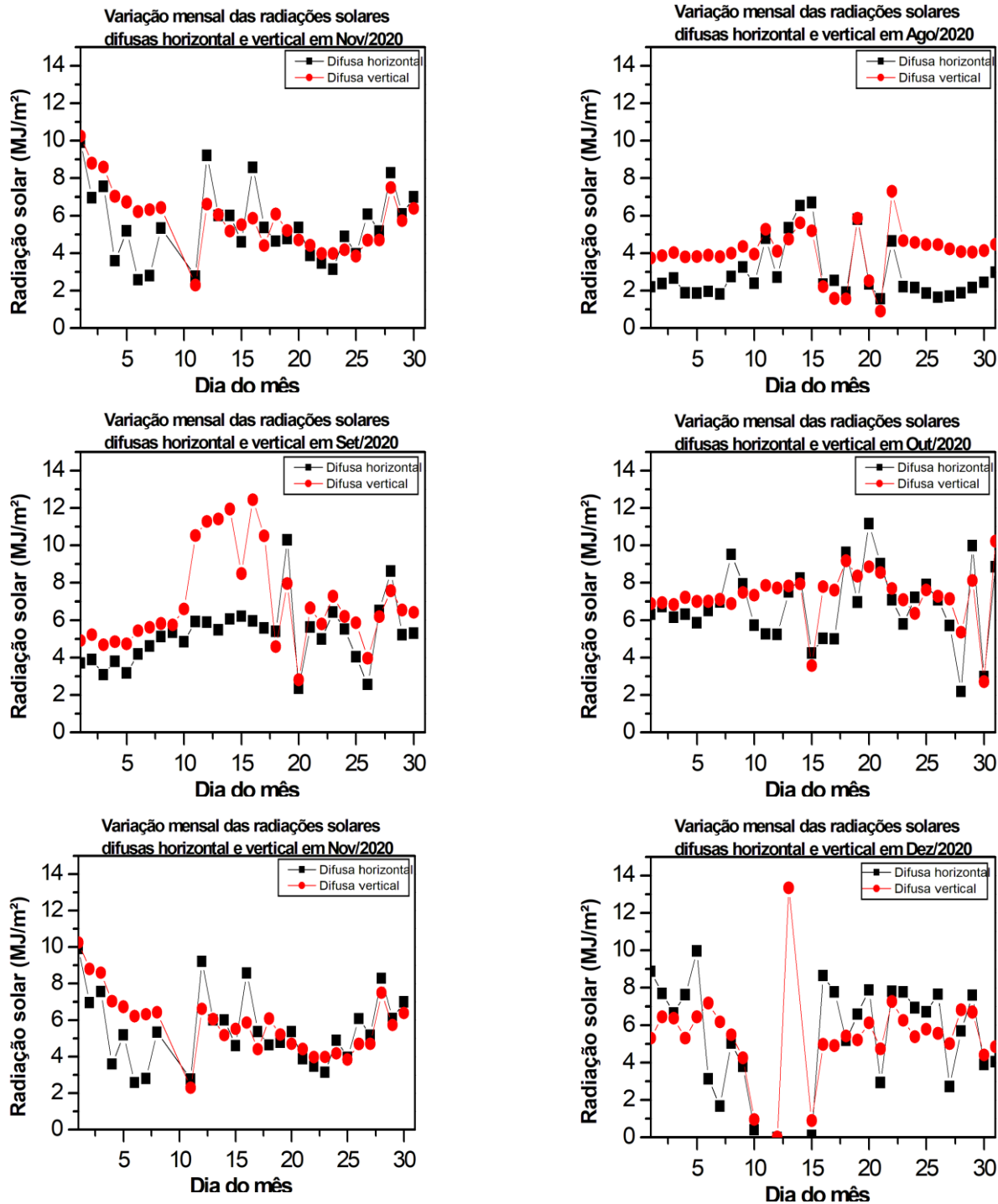
A Figura 9 mostra a evolução mensal das radiações difusas horizontal e vertical para os meses de janeiro a dezembro de 2020 para Botucatu-SP. Como neste ano as medidas da radiação solar difusa foram ajustadas, devido à alteração da declinação solar ao longo do ano, é notado que entre março a setembro, a radiação solar difusa em superfície vertical é maior que em superfície horizontal. Em maio foi observado falta de dados para as duas medidas, por algum problema técnico. Contudo, como a radiação solar em superfícies inclinadas é composta não só pela radiação direta e difusa, mas também pela porção refletida, que é a radiação solar refletida pela superfície em direção ao céu ou ao solo. A porção refletida depende do ângulo de incidência da radiação solar e das características da superfície, como o seu albedo.

A hipótese de que há relação entre medidas da radiação refletida e difusa vertical sugere que a quantidade de radiação solar refletida em uma superfície inclinada pode estar relacionada com a quantidade de radiação solar difusa que atinge a superfície vertical. Essa relação pode ser explorada para desenvolver métodos de estimativa de radiação solar difusa vertical a partir de medidas de radiação solar refletida em superfícies inclinadas, o que pode ser útil em áreas onde não há medições diretas da radiação solar difusa vertical.

Assim, trabalhos futuros poderiam investigar essa relação entre as frações de radiação solar refletida e difusa vertical para aprimorar as técnicas de estimativa de radiação solar difusa vertical, o que seria útil para a modelagem do desempenho de sistemas de energia solar, como painéis solares e sistemas de aquecimento solar, por exemplo. Além disso, essa pesquisa pode contribuir para o desenvolvimento de estratégias de gerenciamento de energia mais eficientes e sustentáveis.

Figura 9 - Evolução mensal das radiações difusas horizontal e vertical para os meses de janeiro a dezembro de 2020 para Botucatu-SP (em MJ/m²)



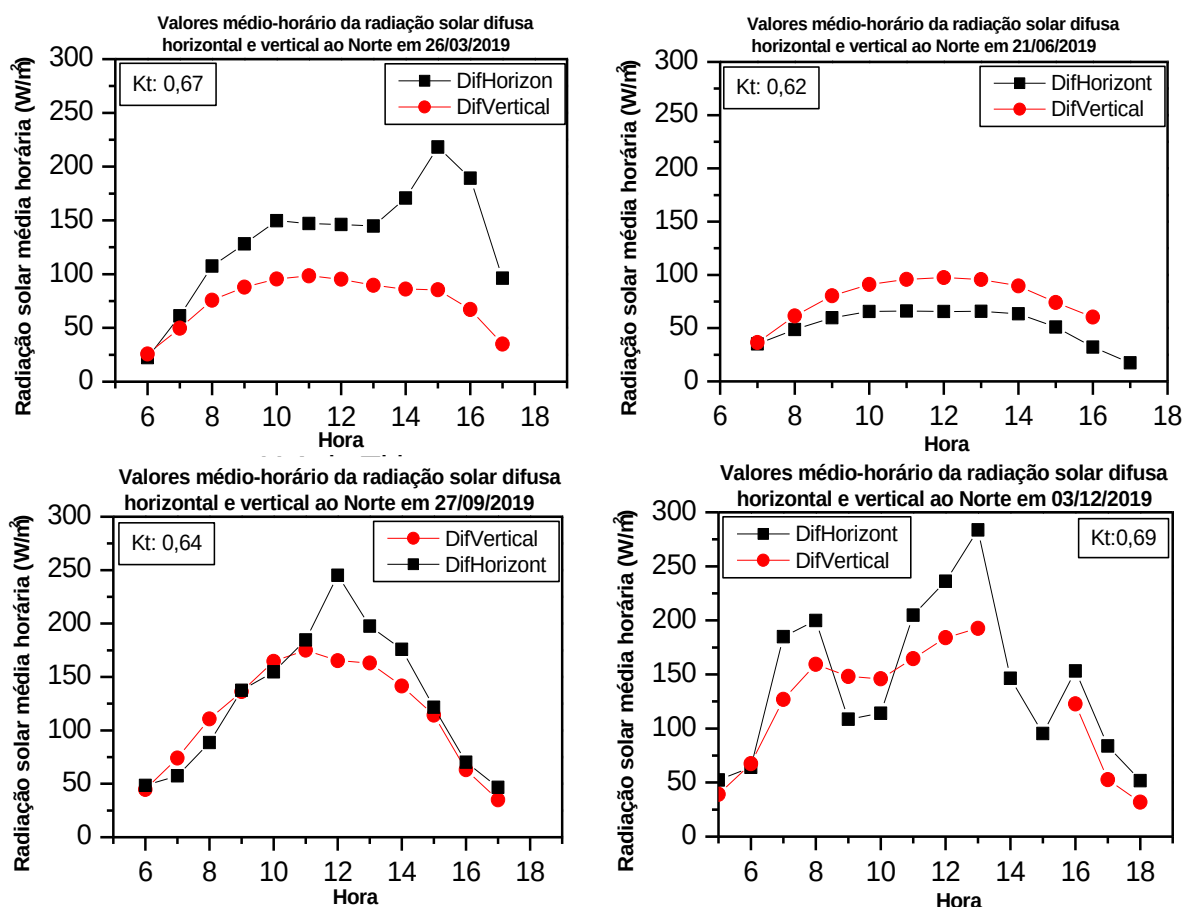


Fonte: Do autor.

Por fim, no intuito de verificar os valores máximos diários de radiação solar difusa incidentes nas superfícies horizontal e vertical, foram escolhidos dias de céu aberto de cada mês, buscando os maiores valores de K_t , para analisar graficamente os valores diários da radiação solar difusa horizontal e vertical para os meses de solstícios e equinócios do ano de 2019. A Figura 10 mostra a variação diária da radiação solar (em W/m^2), escolhido os maiores valores de K_t (dias de céu aberto) nos

meses de solstícios e equinócios de 2019, para Botucatu-SP. A Figura 10 mostra os valores médios-horários da variação diária da radiação solar (em W/m^2), escolhido os maiores valores de K_t (dias de céu aberto) nos meses de solstícios e equinócios de 2020, para Botucatu-SP.

Figura 10 – Valores médio-horário da radiação solar (em W/m^2), escolhido os maiores valores de K_t (dias de céu aberto) nos meses de solstícios e equinócios de 2019, para Botucatu-SP



Fonte: Do autor.

Em março de 2019, no dia analisado, os valores máximos medidos foram às 11 horas para superfície vertical, medindo $98,4 \text{ W/m}^2$ e de $149,7 \text{ W/m}^2$ às 10 horas na superfície horizontal. O aumento causado no período da tarde foi causado por um desalinhamento do anel de sombreamento, que mediu também a radiação solar global horizontal.

Em junho, no dia analisado, mostram valores máximos de $97,4 \text{ W/m}^2$ ao meio-dia para superfície vertical e de 66 W/m^2 para horizontal.

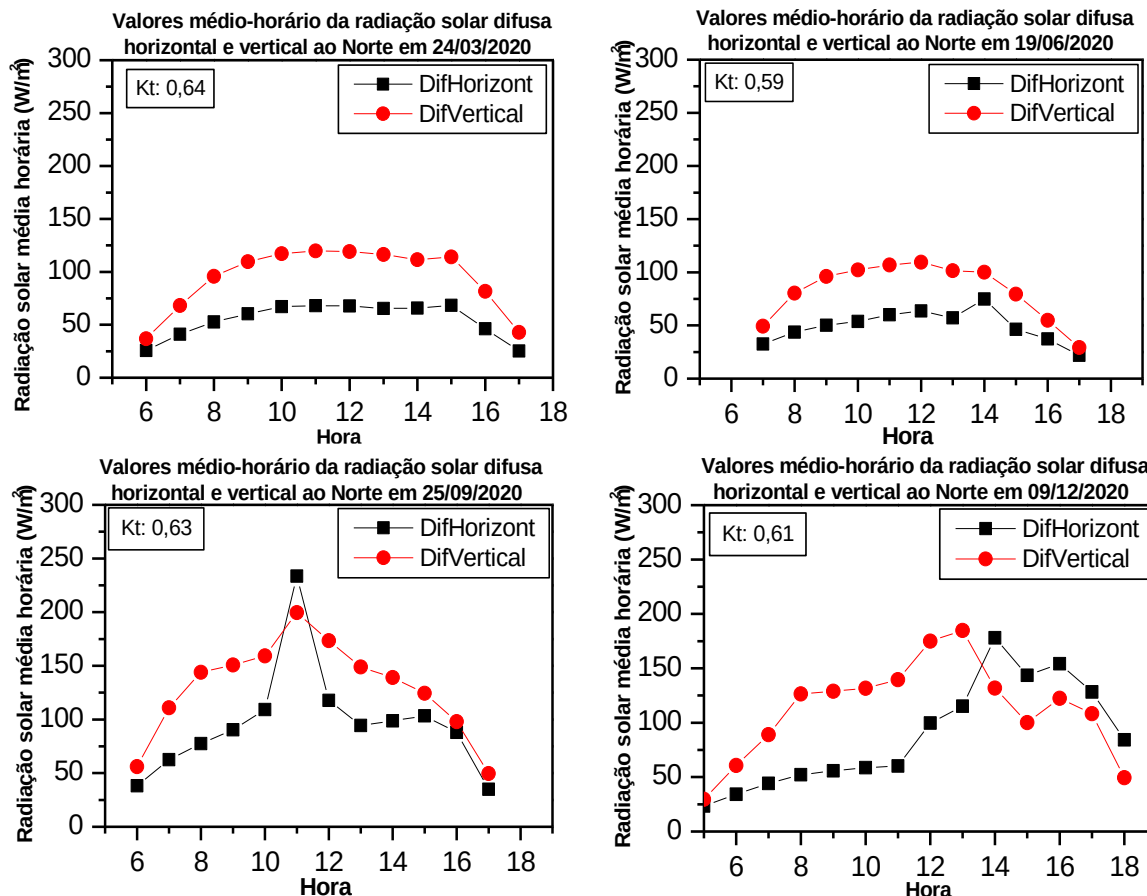
Em setembro, as medidas são semelhantes ao longo do dia para as duas medidas, ocorrendo os maiores valores medidos para superfície horizontal ao meio-dia, medindo $245,2 \text{ W/m}^2$. Para superfície vertical, o maior valor medido foi às 11 horas, medindo 175 W/m^2 .

Em dezembro, há falta de dados da radiação difusa vertical no período da tarde, pois o sensor não consegue realizar medidas neste período do ano, por conta da declinação solar, nesta época do ano, o sol percorre seu trajeto mais ao Sul, passando atrás do sensor de medida. Nesta época do ano, alguns valores medidos foram excluídos na filtragem dos dados, por estarem muito baixos. Às 13 horas, houve um pico de $283,6 \text{ W/m}^2$ para superfície horizontal e de 192 W/m^2 para a superfície vertical. Os desvios ocorridos às 7 e às 16 horas foram ocasionados por conta do movimento aparente do Sol, que projetou feixes diretos da radiação no sensor, medindo a radiação solar global nestes horários.

Para os 4 dias analisados, a quantidade incidente de radiação solar difusa em superfície horizontal é superior comparado com a superfície vertical, exceto em junho, quando a declinação solar está mais ao Norte.

A Figura 11 mostra a variação diária da radiação solar (em W/m^2), escolhido os maiores valores de K_t nos meses de solstícios e equinócios de 2020, para Botucatu-SP. Neste ano, as medidas da radiação solar difusa horizontal foram mais precisas, porém, ainda assim, a variação horária também mostra maiores medidas da radiação difusa vertical em relação às medidas para horizontal ao longo do ano. Para março, ao meio-dia mediu, em média, 119 W/m^2 na vertical e $67,7 \text{ W/m}^2$ na horizontal. Em junho, mediu 109 W/m^2 ao meio-dia na superfície vertical e 63 W/m^2 na horizontal. Em setembro, às 11:00, houve um pico de 200 W/m^2 em superfície vertical e 233 W/m^2 em superfície horizontal.

Figura 11 - Valores médio-horário da radiação solar (em W/m^2), escolhido os maiores valores de Kt nos meses de solstícios e equinócios de 2020, para Botucatu-SP

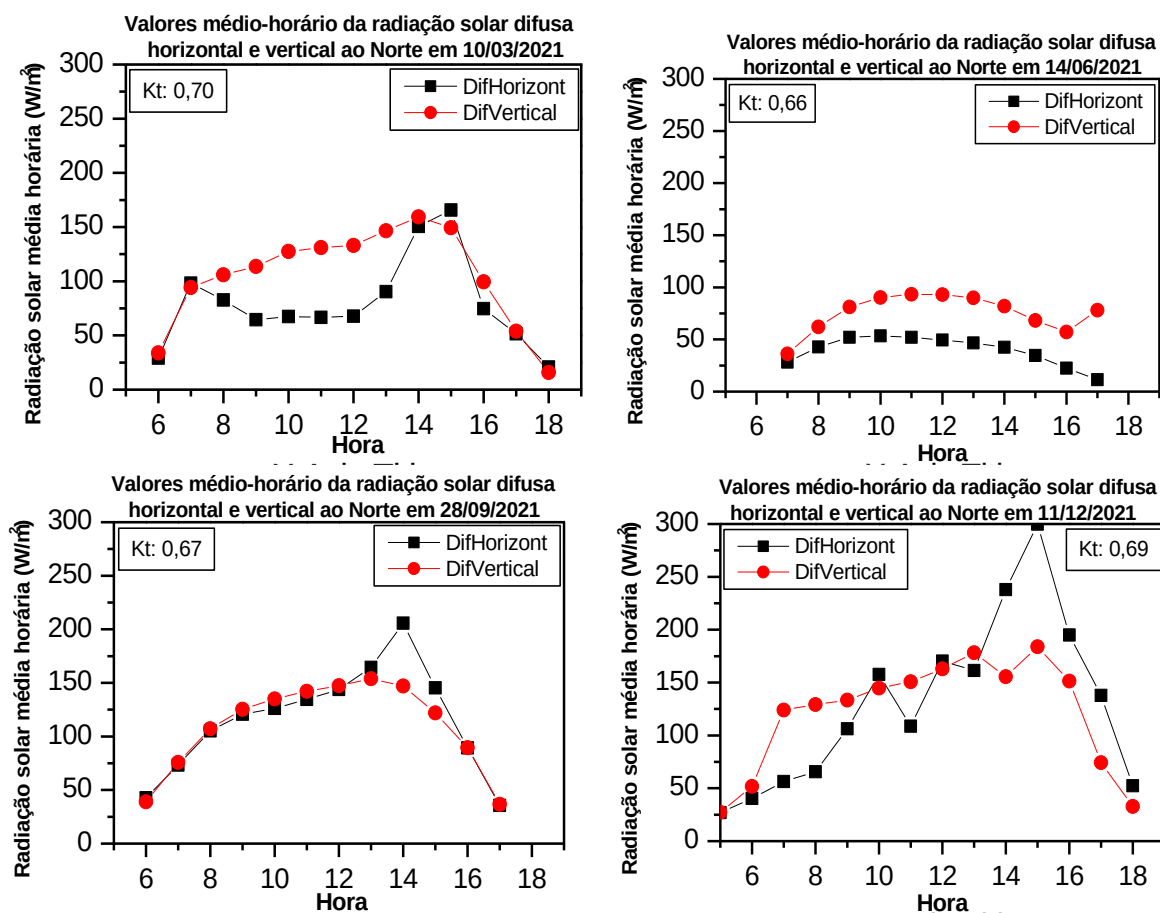


Fonte: Do autor.

Em 2021(Figura 12), percebe-se que o padrão das medidas para os 4 dias analisados foi semelhante à 2020. Em março, as medidas das radiações difusas horizontal e vertical foram iguais no início e final do dia. Em junho, período de inverno, as medidas das radiações solares difusas foram menores, com medidas máximas no período da tarde, medindo 159,4 W/m^2 às 14 horas em superfície vertical e 165,7 W/m^2 às 15 horas, em superfície horizontal. Em setembro, período com pouca nebulosidade e quando acontece o equinócio, as duas medidas comparadas foram muito semelhantes. Apenas durante às 14 horas, que a radiação solar difusa horizontal mediu, em média, 205,7 W/m^2 e em superfície vertical mediu 147 W/m^2 . Em dezembro, período de verão, com maior nebulosidade, as medidas são maiores que nos outros períodos do ano. Devido à declinação solar nesta época, onde o Sol percorre seu trajeto mais ao Sul, passando atrás do sensor posicionado ao Norte, a radiação difusa horizontal foi maior que a vertical. Os valores máximos foram medidos no

período da tarde. Às 15 horas, as medidas em superfície horizontal foram, em média, 299,8 W/m² e 183,9 W/m² para superfície vertical.

Figura 12 - Valores médio-horário da radiação solar (em W/m²), escolhido os maiores valores de Kt nos meses de solstícios e equinócios de 2021, para Botucatu-SP



Fonte: Do autor.

2.5 CONCLUSÕES

A partir desse estudo, foram obtidas as seguintes conclusões:

- ✓ Em 2019, radiação solar difusa horizontal é, em média, 25% maior que em superfície vertical. Em 2020, a intensidade de radiação difusa em superfície vertical foi, em média, 18% maior que para superfície horizontal. Em 2021, os valores da radiação difusa horizontal foram, em média, 30% maiores que para superfície vertical, em Botucatu-SP e região;

- ✓ Como a radiação solar em superfícies inclinadas é composta, além da direta e difusa, tem-se o adicional da porção refletida, surge a hipótese de que há relação entre medidas da radiação refletida e difusa vertical, sugerindo trabalhos futuros para verificar a relação entre estas duas frações da radiação solar.
- ✓ Como recomendação de trabalhos futuros, para a continuidade do estudo, sugere-se realizar medidas da incidência vertical em outras orientações cardinais, a fim de se obter maiores informações sobre o comportamento da radiação solar difusa em superfície vertical nas demais fachadas;
- ✓ A partir desse estudo, para sua continuidade, recomenda-se criar um modelo de estimativa de radiação solar difusa em superfícies verticais para Botucatu-SP e região, que auxiliará em pesquisas do uso de iluminação passiva e conforto térmico.

REFERÊNCIAS

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**, Kidlington, v. 136, p. 629–638, 2016.

CODATO, G.; Oliveira, A. P.; Soares, J.; Escobedo, J. F.; Gomes, E. N.; Dal Pai, A. Global and diffuse solar irradiances in urban and rural areas in Southeast Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, Wien, v.93, p.57-73, 2008.

CONFAZ – **CONVÊNIO ICMS 101/97**. Disponível em: <https://www.confaz.fazenda.gov.br/legislacao/convenios/1997/CV101_97>. Acesso em 08 nov. 2021.

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**, Kidlington, v. 81, n. 5, p. 692-695, 2007.

DAL PAI, A. Anisotropia da irradiância solar difusa medida pelo método de sombreamento Melo-Escobedo: fatores de correção anisotrópicos e modelos de estimativa. 2005. 87f. **Tese (Doutorado em Energia na Agricultura)**, Faculdade de Ciências Agronômicas, Unesp, Botucatu, 2005.

DAL PAI, A.; ESCOBEDO, J. F.; CORREA, F. H. P. Numerical correction for the diffuse solar irradiance by the Melo-Escobedo shadowring measuring method. In: **Ises Solar World Congress 2011**, 2011, Kassel.

DAL PAI, A., ESCOBEDO, J., DAL PAI, E. SANTOS, C. dos. (2014). Estimation of Hourly, Daily and Monthly Mean Diffuse Radiation Based on MEO Shadowring Correction. **Energy Procedia**, Amsterdam, [online] 57, pp.1150-1159. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610214014696>>. Acesso em 08 nov. 2021.

DAL PAI, A., Escobedo, J. F., Pai, E. D., Oliveira, A. P., Soares, J. R., & Codato, G. (2016). MEO shadowring method for measuring diffuse solar irradiance: Corrections based on sky cover. **Renewable Energy**, Oxford, 99, 754-763. doi:10.1016/j.renene.2016.07.026

DÍEZ-MEDIAVILLA, M., RODRÍGUEZ-AMIGO, M., DIESTE-VELASCO, M., GARCÍA-CALDERÓN, T. E ALONSO-TRISTÁN, C. The PV potential of vertical façades: A classic approach using experimental data from Burgos, Spain. **Solar Energy**, Kidlington, v. 177, p. 192-199, 2019.

DRUMMOND, A. J. On the measurements of sky radiation. **Archiv. fur Meteorologie. Geophysik Bioklimatologie**, v.7, p.413-36, 1956.

HALAWA, E.; VAN HOOFF, J.; SOEBARTO, V. The impacts of the thermal radiation field on thermal comfort, energy consumption and control—A critical overview. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Oxford, v. 37, p.907-918, set. 2014.

HEIM, D. KNERA, D. A novel photometric method for the determination of reflected solar irradiance in the built environment. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Oxford, v. 137, p. 110451, 2021. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032120307383#!>>. Acesso em: 8 nov. 2021.

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

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

LEBARON, B. A.; Michalsky, J. J.; Perez, R. A simple procedure for correcting shadowband data for all sky conditions. **Solar Energy**, Kidlington, v.44, n.5, p.249-56, 1990.

LIU, B, JORDAN R. The long-term average performance of flat-plate solar-energy collectors. **Solar Energy**, Kidlington, V.7, n. 2, p. 53-74, 1963.

LIU, D., SUN, Y., WILSON, R. E WU, Y. Comprehensive evaluation of window-integrated semi-transparent PV for building daylight performance. **Renewable Energy**, Oxford, v. 145, p. 1399-1411, 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148119306512?via%3Dihub>>. Acesso em 08 nov. 2021.

LONG, C. N.; DUTTON, E. G. BSRN Global Network Recommended Quality Control Tests. **BSRN Technical Report**, v. 2, 2002. Acesso em: 26 out. 2018. Disponível em: https://epic.awi.de/id/eprint/30083/1/BSRN_recommended_QC_tests_V2.pdf.

MUNEER, T.; YOUNES, S.; MUNAWWAR. Discourses on solar radiation modeling. **Renewable and Sustainable Energy**, New York, v. 11, p. 551-602, 2007.

MARKVART, TOMCASTANER, LUIS. Practical Handbook of Photovoltaics. Amsterdam-Duivendrecht: **Elsevier Advanced Technology** [Imprint], 2003.998 p. ISBN 978-1-85617-390-2. DOI <https://doi.org/10.1016/B978-1-85617-390-2.X5000-4>

MELO, J. M. D. Desenvolvimento de um sistema para medir simultaneamente radiações global, difusa e direta. Botucatu-SP, 1993, 130p. **Tese (Doutorado Agronomia/Energia na Agricultura)** – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.

MELO, J. M. D., ESCOBEDO, J. F. Medida da radiação solar difusa. In: ENERGÍAS LÍMPIAS EN PROGRESO, VII CONGRESO IBÉRICO DE ENERGIA SOLAR, Vigo, Espanha. **Anais INTERNATIONAL SOLAR ENERGY SOCIETY**, v. 1, 1994.

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, Oxford, v. 47, p. 504-518, 2015.

OLIVEIRA, A. P., ESCOBEDO, J. F., MACHADO, A. J. A new shadow-ring device for measuring diffuse solar radiation at surface. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, Boston, v. 19, p. 698-708, 2002a.

OLIVEIRA, A. P., ESCOBEDO, J. F., MACHADO, A. J., SOARES, J. Correlation models of diffuse solar-radiation applied to the city of São Paulo, Brazil. **Applied Energy**, Oxford, v.71, p.59-73, 2002b.

PEREZ, Richard *et al.* A new simplified version of the perez diffuse irradiance model for tilted surfaces. **Solar Energy**, Kidlington, v. 39, n. 3, p. 221-231, 1987. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/s0038-092x\(87\)80031-2](https://doi.org/10.1016/s0038-092x(87)80031-2). Acesso em: 6 nov. 2022.

ROBINSON, N.; STOCH, L. Sky Radiation Measurement and Corrections. **Journal of Applied Meteorology**, Boston, v. 3, n. 2, p. 179-181, abr. 1964. Disponível em: [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1964\)003%3C0179:srmac%3E2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1964)003%3C0179:srmac%3E2.0.co;2). Acesso em: 7 nov. 2022.

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.

STONE, R. J. Improved statistical procedure for the evaluation of solar radiation estimation models. **Solar Energy**, Kidlington, v.51, n.4, p.289-91, 1993.

TREGENZA, P. R. *et al.* **Guide to recommended practice of daylight measurement. Vienna: Cimmission Internationale de l'éclairage (CIE)**, 1994. Disponível em: <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:103820>. Acesso em: 16 nov. 2021.

VAREJÃO SILVA, M.A. **Meteorologia e Climatologia**. Recife: Versão Digital, 2006. 181 p.

CAPÍTULO 3

MODELOS DE ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO SOLAR DIFUSA EM SUPERFÍCIE INCLINADA

3.1 INTRODUÇÃO

O Brasil possui uma grande vantagem para o uso da energia solar como fonte alternativa de energia em comparação com países, como a grande extensão territorial e sua localização geográfica, onde a incidência de radiação solar é alta durante todo o ano. Ainda assim, em certas aplicações, como em projetos arquitetônicos, altos níveis de radiação solar apresentam algumas desvantagens em termos de carga de resfriamento solar, especialmente com edifícios com uma grande quantidade de janelas de vidro instaladas como fachadas de construções. Um grande sistema de condicionador de ar se torna necessário para remover essa carga alta de calor. O consumo médio típico de energia para condicionadores de ar no Brasil, em porcentagem da energia total consumida em edificações é a seguinte: Edifícios Públicos: 8%, Comercial: 17% e Residencial: 26%, (BRASIL - MME, 2018, p. 8).

Os dados sobre o incidente de radiação solar em edifícios são um parâmetro importante que deve ser considerado ao projetar um edifício com eficiência energética. Os dados de radiação solar necessários incluem radiação solar direta e difusa. A maioria dos dados de radiação solar disponíveis são geralmente medidos em um plano horizontal. Uma maneira de medir a radiação solar local para ambas as frações é usar um piranômetro para medir a radiação solar global e um pireliômetro para medir a componente direta da radiação solar. Além disso, também é necessário um dispositivo de rastreamento solar para o pireliômetro rastrear a posição solar ao longo do dia, a fim de captar os feixes diretos de radiação solar (IQBAL, 1983, p. 339).

A componente difusa da radiação solar pode ser avaliada a partir da diferença entre a radiação solar horizontal global medida e a radiação solar direta normal. A desvantagem deste método é que o pireliômetro e o dispositivo de rastreamento solar são onerosos. Outro método bastante popular para medir a radiação solar difusa é instalar um dispositivo de anel de sombra no piranômetro. O dispositivo de anel de sombreamento é composto por um anel de sombreamento, que fornece uma sombra

sobre o sensor do piranômetro ao longo do dia. O anel de sombra bloqueia a radiação solar normal direta para medir a radiação difusa.

Pela necessidade crescente de dados do incidente de radiação solar nos planos verticais para usar no projeto de edifícios, e na falta destes sensores e equipamentos, a radiação solar pode ser estimada a partir dos modelos de estimativa da radiação solar. Existem vários estudos testando modelos de estimativa desenvolvidos para estimar a radiação solar em todo o mundo (Bellaoui, Bouchouicha & Oulimar, 2021, p.1; Jamil, Abid & Siddiqui, 2018, p. 161; Obiwulu et al, 2022, p. 1; Tahira et al, 2021, p.1; Teyabeen et al, 2022, p.1). Porém, medidas da radiação solar em superfícies verticais são escassas. Não há dados coletados em outra região do Brasil medindo a radiação solar em superfície vertical, deixando de lado o conhecimento do potencial energético de fachadas de prédios, etc.

Neste estudo, foram utilizados dados de medidas de radiação solar para testar modelos clássicos de estimativa da radiação solar difusa em superfícies inclinadas testados em superfícies verticais ao Norte em Botucatu-SP. As radiações solares globais e difusas foram medidas por três anos (2019, 2020 e 2021) por meio de um dispositivo de anel de sombreamento do tipo MEO, instalado na estação de radiometria do Departamento de Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia da Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP de Botucatu, situada no estado de São Paulo, região sudeste do Brasil (22° 53'S, 48° 26'O).

Este trabalho tem como objetivo:

1. Testar seis modelos clássicos da literatura para a estimativa da irradiação difusa desenvolvidos em superfícies inclinadas, aplicados para superfície vertical;
2. Comparar os resultados com dados da estação de radiometria de Botucatu-SP medidos em superfície vertical, a fim de validar os modelos para esta localidade.

3.2 REVISÃO DE LITERATURA

3.2.1 Modelos clássicos de estimativa da radiação solar difusa horária em superfícies inclinadas

3.2.1.1 Modelo geométrico

Este modelo se aplica a condições de céu aberto e sem nuvens. Ele assume que toda radiação incidente em uma superfície horizontal é proveniente da direção do sol. Geralmente, este modelo superestima os valores da irradiação solar difusa (IQBAL, 1983, p. 313). Sendo assim, a irradiação solar difusa horária em superfície inclinada pode ser calculada pela seguinte equação:

$$H_{\beta d}^d = H_d^d R_B \quad (1)$$

Onde: $H_{\beta d}^d$: Irradiação solar difusa em plano inclinado (MJ/m²); H_d^d : Irradiação difusa incidente na superfície horizontal (MJ/m²); R_B : Fator de correção devido à mudança no ângulo de incidência dos raios solares sobre a superfície inclinada.

3.2.1.2 Modelo isotrópico de Liu & Jordan (1963):

Este modelo assume que a intensidade da radiação difusa é proveniente da cúpula celeste. Ele subestima a irradiação difusa nas superfícies voltadas para o Norte (no hemisfério Sul). A radiação solar difusa horária incidente em superfície inclinada é dada pela seguinte expressão (LIU & JORDAN, 1963, p. 53):

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

Onde: β : Inclinação da superfície (graus).

3.2.1.3. Modelo anisotrópico de Klucher (1979):

Modelo mais complexo, onde tenta-se modelar a condição do céu parcialmente nublado. Essa condição pode variar entre condições de céu claro a condições de céu extremo nublado. Este modelo se baseia no modelo de Temps & Coulson (1977), que é apresentado na equação 3, a seguir.

$$H_{\beta d}^d = H_d^d (1 + \cos(\beta)) \left[1 + \sin^3 \left(\frac{\beta}{2} \right) \right] [1 + \cos^2(\theta_\beta) \sin^3(\theta_z)] \quad (3)$$

Onde θ : Ângulo de incidência para uma superfície arbitrariamente orientada (graus);

O primeiro fator da equação leva em conta a o aumento da intensidade da radiação difusa do céu ao redor do sol. O segundo fator leva em conta o brilho do céu próximo ao horizonte (IQBAL, 1983, p. 315).

O modelo de Klucher é baseado em um estudo de condições de céu claro, criado por Temps e Coulson (1977). Este modelo modificado por Klucher incorporou condições de céu nublado em sua equação, adicionando o fator F , fator de modulação que incorpora as condições do céu nublado. Quando o céu está completamente nublado $F = 0$ e equação 4 reverte para o modelo isotrópico. O modelo de Klucher é este, a seguir:

$$H_{\beta d}^d = H_d^d (1 + \cos(\beta)) \left[1 + \sin^3\left(\frac{\beta}{2}\right) \right] [1 + F \cos^2(\theta_\beta) \sin^3(\theta_z)] \quad (4)$$

Onde: θ_β : Ângulo de incidência (graus); θ_z : Ângulo Zenital (graus); F é calculado pela equação 5, a seguir:

$$F = 1 - (H_d^d / H_g^d)^2 \quad (5)$$

3.2.1.4. Modelo anisotrópico de Hay (1979):

Segundo IQBAL (1983), Hay considera que a radiação solar difusa em uma superfície horizontal ou inclinada é composta por um componente circunsolar proveniente diretamente da direção do Sol, e um componente difuso distribuído isotropicamente do resto da cúpula celeste.

Esses dois componentes são considerados de acordo com um índice de isotropia. Esse índice é essencialmente uma razão entre a radiação solar direta em superfície horizontal na Terra e a radiação solar extraterrestre em superfície horizontal, mostrado na equação 8.

A radiação difusa total em uma superfície horizontal é dividida em duas frações: circumsolar e radiação difusa isotrópica, disposta na equação 6, a seguir, na correlação empírica de Hay (IQBAL, p. 315):

$$H_{\beta d}^d = I_c + I_{SI} = H_d^d \left[A_I R_B + \frac{1}{2} (1 + \cos(\beta)) (1 - A_I) \right] \quad (6)$$

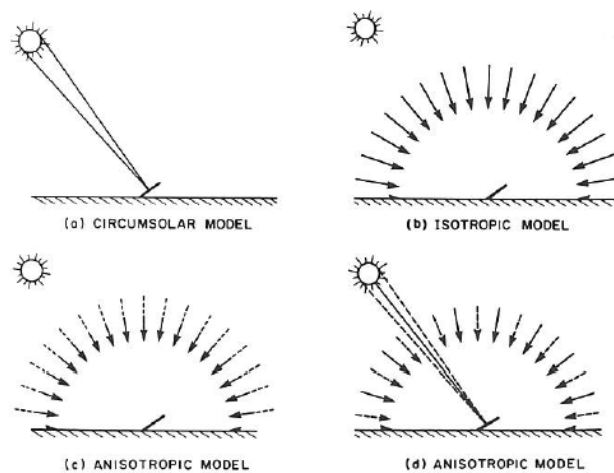
Onde: I_c : Irradiação difusa circumsolar (MJ/m²); I_{SI} : Irradiação difusa isotrópica (MJ/m²); A_I : Índice anisotrópico:

$$A_I = \left(\frac{H_{bh}^d}{H_0^d} \right) \quad (7)$$

Onde: H_{bh}^d : Irradiação direta projetada na horizontal (MJ/m²); H_0^d : Irradiação extraterrestre na superfície horizontal (MJ/m²).

A Figura 1 mostra os 4 modelos de estimativa da radiação solar difusa e suas respectivas maneiras de considerar a radiação solar difusa. Modelo Geométrico (Circumsolar), Isotrópico de Liu & Jordan e Anisotrópicos de Klucher e Hay.

Figura 1 - Modelos clássicos da radiação solar difusa em superfícies inclinadas: Modelo Geométrico (Circumsolar) (a), Isotrópico de Liu & Jordan (b) e Anisotrópicos de Klucher (c) e Hay (d)



Fonte: IQBAL (1983, p. 314)

3.2.1.5 Modelo anisotrópico de Perez et al. (1987):

Este modelo é usado para estimar a irradiância em passos de tempo curtos (horário ou menos) em planos inclinados com base na irradiância global e direta (ou difusa). Demonstrou ter um desempenho mais preciso do que outros modelos para muitos locais em todo o mundo.

As principais premissas que definem o modelo incluem (1) uma descrição da cúpula do céu com uma zona circumsolar e uma zona do horizonte sobrepostas sobre um fundo isotrópico e (2) uma parametrização das condições de insolação (com base nas entradas disponíveis para o modelo), determinando o valor da potência radiante provenientes destas duas zonas (Perez et al., 1987, p. 223:).

$$H_{\beta d}^d = H_d^d \left[\frac{1}{2} (1 + \cos(\beta)) (1 - F_1) + F_1 R_B + F_2 \sin(\beta) \right] \quad (8)$$

Onde: F_1 : Irradiação difusa circumsolar (MJ/m²), expressa por:

$$F_1 = F_{11} + F_{12}\Delta + F_{13}\theta_Z \quad (9)$$

F_2 : Irradiação difusa horizontal (MJ/m²), conforme equação à seguir:

$$F_2 = F_{21} + F_{22}\Delta + F_{23}\theta_Z \quad (10)$$

Onde: Δ é o Índice atmosférico, obtido a partir da seguinte equação:

$$\Delta = m_r H_d^d / H_0^d \quad (11)$$

H_d^d : Radiação solar direta na horizontal; H_0^d : Irradiação solar extraterrestre em superfície horizontal; m_r é a massa ótica do ar, calculada pela equação a seguir:

$$m_r = \frac{1}{[\cos \theta_Z + 0,15(93,885 - \theta_Z)]^{-1,253}} \quad (12)$$

Onde: θ_Z Ângulo zenital (em radianos).

Para encontrar os valores de F_{11} à F_{23} presentes na Tabela 2, é necessário calcular o índice de turbidez de céu, indo de totalmente nublado (categoria 1) à

totalmente aberto (categoria 8), conforme Tabela 1. O índice é calculado a partir da equação a seguir:

$$e = (H_d^d + H_b^d)/H_d^d \quad (13)$$

Tabela 1 - 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	$> 10,080$

Fonte: Perez et al, 198,7 p. 224.

Tabela 2 - 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

Fonte: Perez et al, 1987, p. 224.

3.2.2 Radiação solar difusa diária em superfícies inclinadas

A quantidade diária de radiação solar circumsolar difusa incidente em uma superfície inclinada é dada por (IQBAL, 1983, p. 316):

$$H_s = H_d R_b \quad (14)$$

Onde H_d : Radiação solar difusa diária em superfície horizontal (MJ m⁻² dia⁻¹).

A quantidade diária de radiação solar isotrópica difusa incidente em uma superfície inclinada é dada por:

$$H_s = \frac{1}{2} H_d (1 + \cos(\beta)) \quad (15)$$

A quantidade diária de radiação solar anisotrópica difusa incidente em uma superfície inclinada é dada por (IQBAL, 1983, p. 317):

$$H_s = \sum^{dia} \left\{ I_d \left(\frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right) \left[1 + F \sin^3 \left(\frac{\beta}{2} \right) \right] (1 + F \cos^2(\theta) \sin^3(\theta_z)) \right\} \quad (16)$$

Onde θ : Ângulo entre o feixe dos raios solares e a superfície normal (graus);

A quantidade diária de radiação solar anisotrópica difusa incidente em uma superfície inclinada é dada por (Hay, 1979):

$$H_s = H_d \left\{ \left[\frac{H - H_d}{H_0} \right] R_b + \frac{1}{2} (1 + \cos(\beta)) [1 - (H - H_d)/H_0] \right\} \quad (17)$$

Onde: H_0 : Radiação solar extraterrestre diária incidente em superfície horizontal (MJm⁻²dia⁻¹); H : Radiação solar global diária incidente em superfície horizontal (MJm⁻²dia⁻¹).

3.3 MATERIAL E MÉTODOS

3.4.1 Local e clima

Este estudo foi realizado utilizando medidas da irradiação solar global em plano horizontal e radiação solar difusa vertical orientado ao Norte geográfico, situado na estação de radiometria do Departamento de Engenharia de Bioprocessos da Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP de Botucatu (latitude 22° 54' S, longitude 48° 27' O e altitude 716 m). As medidas foram realizadas no período de 2019, 2020 e 2021. A cidade de Botucatu possui 148.130 habitantes, situada próxima à 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 do tipo Cwa, que corresponde a um clima subtropical úmido. Durante o verão, o clima é quente, úmido e chuvoso, enquanto o inverno apresenta temperaturas amenas e seco. Os valores de temperatura e umidade relativa do ar variam de acordo com as mudanças astronômicas, sendo que os valores máximos são registrados em fevereiro (23,12 °C e 78,25%, respectivamente) e os valores mínimos de temperatura são observados em julho (17,10 °C) e de umidade relativa em agosto (63,97%). A estação chuvosa ocorre durante o verão e a primavera, acompanhada de grande nebulosidade. Cerca de 80% da precipitação anual concentra-se nesse período, com o pico máximo de chuvas em janeiro (246,2 mm). Durante o inverno e o outono, a média de precipitação mensal é inferior a 100 mm, sendo que o valor mínimo é registrado em agosto (36,1 mm) (TIEGHI, 2018, p.25).

3.4.2 Instrumentação

As medidas instantâneas foram coletadas a cada 1 minuto por um *Datalogger* modelo CR3000 da Campbell Scientific, armazenando os dados no formato W/m², durante o período de janeiro a dezembro de 2019, 2020 e 2021.

A irradiância solar difusa em superfície horizontal foi medida com o piranômetro Eppley PSP. A irradiância solar difusa em superfície vertical foi medida com o piranômetro Eppley 8-48. Para medir a irradiância difusa em superfície vertical, o piranômetro foi fixado em uma estrutura de ferro inclinado à 90° orientado para o Norte, sob um anel de sombreamento do tipo MEO, conforme Figura 2, a seguir:

Figura 2 - Piranômetro Eppley 8-48 em superfície vertical ao Norte sob anel de sombreamento MEO.



Fonte: Do autor.

3.4.3 Controle de qualidade (validação de medidas)

O procedimento de controle de qualidade foi aplicado para avaliar a confiabilidade das medidas, uma vez que podem ter sido afetadas por problemas causados pela instrumentação (efeito do cosseno, seletividade espectral e desalinhamento no anel de sombreamento) ou por eventos externos (excremento de aves, orvalho sobre o sensor e rompimento do cabeamento) no local de medição (MUNEER; YOUNES; MUNAWWAR, 2007, p. 554). Portanto, foram impostas condições para identificar e descartar valores incorretos (acima ou abaixo do esperado), na partição temporal instantânea (medidas coletadas a cada 1 minuto), horária e diária, para cada componente medidas (Tabela 3): irradiância global em superfícies horizontal e vertical, difusa em superfícies horizontal e vertical, direta em superfície horizontal e refletida (albedo).

Tabela 3 - Condições de avaliação de medidas do procedimento de controle de qualidade

Tempo	Condição de avaliação	Medida afetada
INSTANTÂNEA (1ª ETAPA) LIMITES FISICAMENTE POSSÍVEIS	$E \leq 5^\circ$	GHI, GVI, DHI, DVI, BHI, RHI
	$0 < GHI \leq (EHI * 1.20)$	GHI
	$0 < DHI \leq (EHI * 0.80)$	DHI
	$0 \leq BHI \leq EHI$	BHI
	$0 \leq RHI \leq (GHI * 0.50)$	BHI
	$0 < GVI$	GVI
	$0 < DVI$	DVI
	$(DHI / GHI) \leq 1.05$	GHI, DHI
	Quando $E > 15^\circ$ e $GHI > 50 \text{ W/m}^2$ $(DHI / GHI) \leq 1.10$	GHI, DHI
	Quando $E \leq 15^\circ$ e $GHI > 50 \text{ W/m}^2$ $(DVI / GVI) \leq 1.05$	GVI, DVI
INSTANTÂNEA (2ª ETAPA) COMPARAÇÃO ENTRE COMPONENTES	Quando $E > 15^\circ$ e $GVI > 50 \text{ W/m}^2$ $(DVI / GVI) \leq 1.10$	GVI, DVI
	Quando $E \leq 15^\circ$ e $GVI > 50 \text{ W/m}^2$	GVI, DVI
	$0 < GHI \leq EHI$	GHI
	$0 < DHI < GHI$	DHI
	$0 < BHI < GHI$	BHI
	$0 < RHI < GHI$	RHI
	$0 < GVI \leq EHI$	GVI
	$0 < DVI < GVI$	GVI
	$0 < GHI \leq EHI$	GHI
	$0 < DHI < GHI$	DHI
HORÁRIA LIMITES FISICAMENTE POSSÍVEIS	$0 < BHI < GHI$	BHI
	$0 < RHI < GHI$	RHI
	$0 < GVI \leq EHI$	GVI
	$0 < DVI < GVI$	GVI
	$0 < GHI \leq EHI$	GHI
	$0 < DHI < GHI$	DHI
DIÁRIA LIMITES FISICAMENTE POSSÍVEIS	$0 < BHI < GHI$	BHI
	$0 < RHI < GHI$	RHI
	$0 < GVI \leq EHI$	GVI
	$0 < DVI < GVI$	GVI
	$0 < GHI \leq EHI$	GHI
	$0 < DHI < GHI$	DHI

Fonte: Do autor.

Legenda: **EHI** = Extraterrestrial Horizontal Irradiation/Irradiance (Extraterrestre); **GHI** = Global Horizontal Irradiation/Irradiance (Global Horizontal); **GVI** = Global Vertical Irradiation/Irradiance (Global Vertical); **DHI** = Diffuse Horizontal Irradiation/Irradiance (Difusa Horizontal); **DVI** = Diffuse Vertical Irradiation/Irradiance (Difusa Vertical); **BHI** = Direct-Beam Horizontal Irradiation/Irradiance (Direta Horizontal); **RHI** = Reflected Horizontal Irradiation/Irradiance (Refletida); **E** = Solar Elevation (Elevação Solar).

O efeito do cosseno, ângulo em que a radiação solar atinge o sensor, é o problema mais recorrente em piranômetros (MUNEER; YOUNES; MUNAWWAR, 2007, p. 554). Pois quanto mais agudo for, geralmente ao nascer e pôr do sol, maior é a inexatidão do valor mensurado. Neste sentido, medidas adquiridas em elevação

solar menores que 5° (momentos após o nascer e antes do pôr do sol) foram descartadas para este estudo. Posteriormente, uma série de avaliações foi aplicada para identificar medidas errôneas, permitindo descartar os valores rejeitados pelas condições impostas. O procedimento da Comissão Internacional de Iluminação - CIE (TREGENZA et al., 1994, p. 1) foi utilizado para identificar medidas abaixo ou acima do limite fisicamente possível na partição temporal instantânea (Tabela 4), horária (Tabela 4) e diária (Tabela 5), tal que o procedimento da Baseline Surface Radiation Network - BSRN (LONG; DUTTON, 2002, p. 1) foi aplicado para comparar as componentes medidas na partição temporal instantânea.

Tabela 4 - Resultado da avaliação das medidas em partição temporal instantânea

Irradiância	Medidas	Medidas restantes após	
	Brutas	1ª etapa	2ª etapa
GHI	596.662	554.316	512.037
GVI	599.414	559.463	539.304
DHI	589.724	549.743	507.464
DVI	600.320	548.691	528.532
BHI	595.038	496.043	496.043
RHI	608.748	544.699	544.699

Fonte: Do autor.

Legenda: **GHI** = Global Horizontal Irradiance (Global Horizontal); **GVI** = Global Vertical Irradiance (Global Vertical); **DHI** = Diffuse Horizontal Irradiance (Difusa Horizontal); **DVI** = Diffuse Vertical Irradiance (Difusa Vertical); **BHI** = Direct-Beam Horizontal Irradiance (Direta Horizontal); **RHI** = Reflected Horizontal Irradiance (Refletida).

Após a aplicação do procedimento de avaliação das medições em partição temporal instantânea os valores foram integrados para se obter as medidas horárias, que também passaram pelo processo de controle de qualidade (Tabela 5). Seguindo o mesmo raciocínio, as medidas que não atenderam a condição de avaliação foram descartadas.

Tabela 5 - Resultado da avaliação das medidas em partição temporal horária

Irradiância	Medidas	
	Antes da avaliação	Após avaliação
GHI	10.339	10.339
GVI	10.125	9.406
DHI	10.246	9.395
DVI	10.226	9.701
BHI	9.965	9.270
RHI	10.391	10.146

Fonte: Do autor.

Legenda: **GHI** = Global Horizontal Irradiation (Global Horizontal); **GVI** = Global Vertical Irradiation (Global Vertical); **DHI** = Diffuse Horizontal Irradiation (Difusa Horizontal); **DVI** = Diffuse Vertical Irradiation (Difusa Vertical); **BHI** = Direct-Beam Horizontal Irradiation (Direta Horizontal); **RHI** = Reflected Horizontal Irradiation (Refletida).

Por fim, após a realização da avaliação dos valores horários as medidas foram somadas para o período completo de um dia, gerando o arquivo final com as medidas em partição temporal diária, onde os valores também passaram por um processo de avaliação de sua qualidade, de forma que ao serem rejeitados pelas condições impostas eram descartados do conjunto final de medições (Tabela 6).

Tabela 6 - Resultado da avaliação das medidas em partição temporal diária.

Irradiância	Medidas	
	Antes da avaliação	Após avaliação
GHI	882	882
GVI	854	854
DHI	872	872
DVI	868	861
BHI	875	863
RHI	883	871

Fonte: Do autor.

Legenda: **GHI** = Global Horizontal Irradiation (Global Horizontal); **GVI** = Global Vertical Irradiation (Global Vertical); **DHI** = Diffuse Horizontal Irradiation (Difusa Horizontal);

DVI = Diffuse Vertical Irradiation (Difusa Vertical); **BHI** = Direct-Beam Horizontal Irradiation (Direta Horizontal); **RHI** = Reflected Horizontal Irradiation (Refletida).

3.4.4 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) (STONE, 1993).

O MBE (Mean Bias Error) é um indicador que mostra o desvio das médias e permite avaliar o desempenho do modelo a longo prazo. Valores positivos de MBE indicam que o modelo tende a superestimar os valores medidos, enquanto valores negativos indicam uma tendência à subestimação. Para avaliar o desempenho do modelo, é importante buscar valores de MBE com menor magnitude. No entanto, é preciso ter em mente que uma superestimativa pode cancelar uma subestimativa, o que é uma limitação do MBE

O RMSE (Root Mean Square Error) é um indicador que representa a raiz quadrada do erro quadrático médio e permite avaliar o desempenho do modelo a curto prazo. Quanto menor o valor do RMSE, menor é a dispersão dos dados em torno do modelo, indicando uma melhor performance.

$$MBE = \left(\frac{\sum_i^N (y_i - x_i)}{N} \right) \quad (20)$$

$$MBE (\%) = 100 \frac{(\sum_i^N (y_i - x_i) / N)}{\bar{x}} \quad (21)$$

$$RMSE = \left(\frac{\sum_i^N (y_i - x_i)^2}{N} \right)^{1/2} \quad (22)$$

$$RMSE (\%) = 100 \frac{\left(\frac{\sum_i^N (y_i - x_i)^2}{N} \right)^{1/2}}{\bar{x}} \quad (23)$$

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.

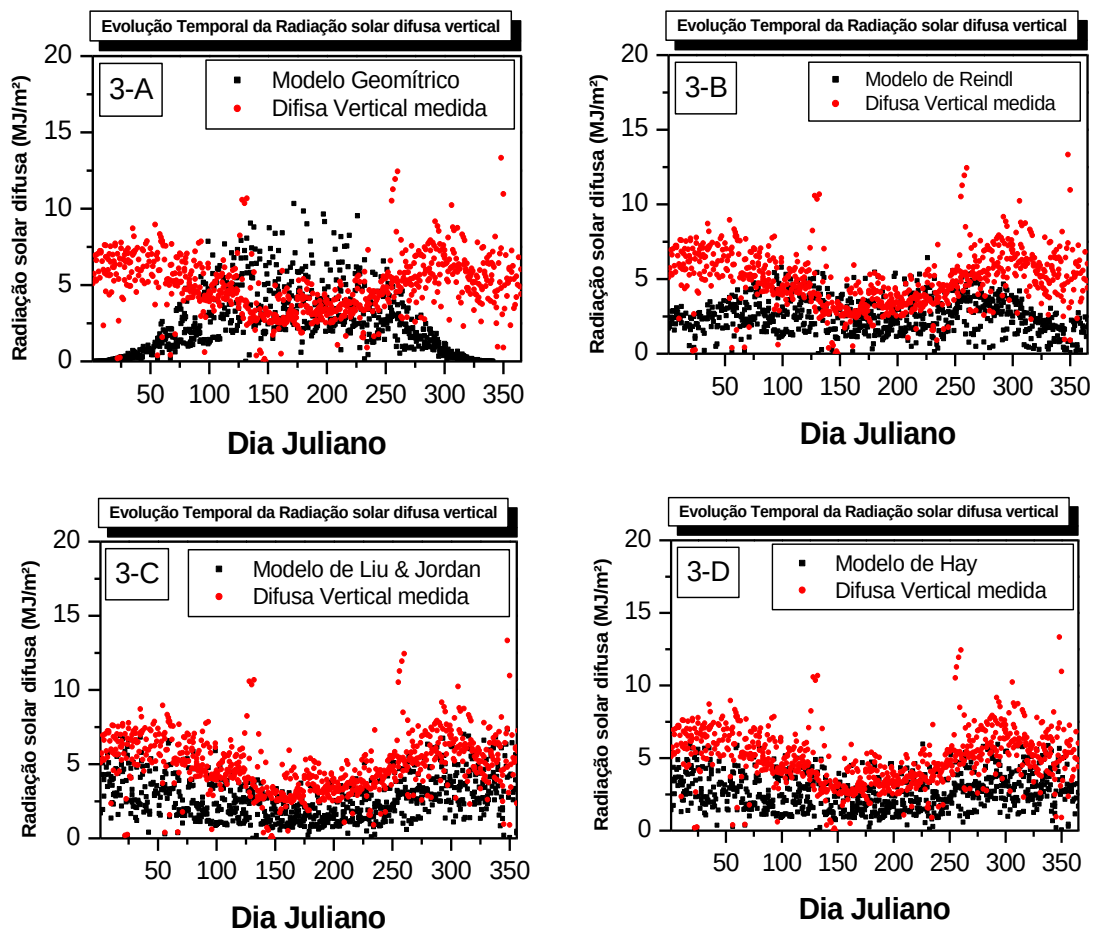
A realização de todos os cálculos e indicadores estatísticos foram através do software *Origin 6.0*.

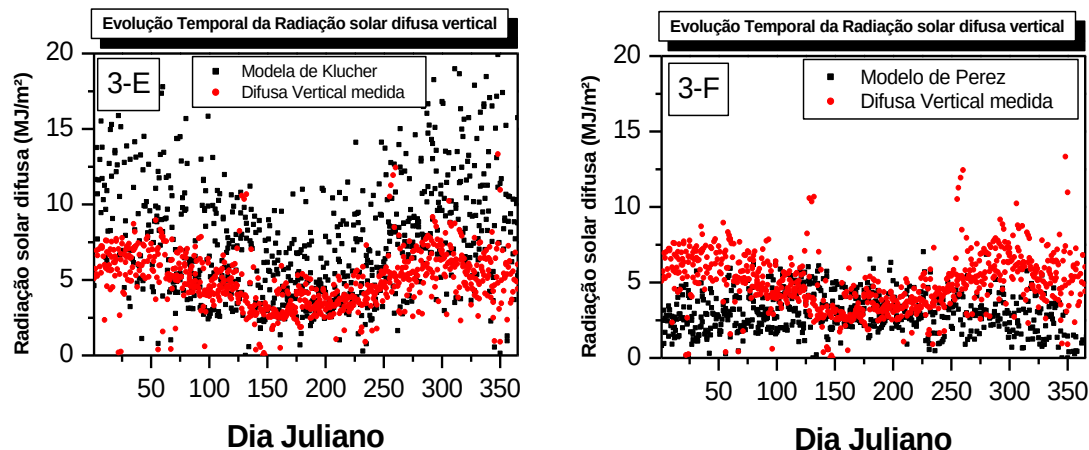
3.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.5.1 Análise dos resultados dos modelos clássicos de estimativa da radiação solar difusa em superfície inclinada comparados com medidas em campo

A Figura 3 mostra os resultados dos modelos clássicos de estimativa da radiação solar difusa criados para superfícies inclinadas, aplicados em superfície vertical em Botucatu-SP.

Figura 3 - Acumulados diários dos valores medidos e estimados para cada modelo avaliado na literatura





Fonte: Do Autor.

O modelo testado que apresentou o pior desempenho na estimativa da radiação solar difusa obtido para Botucatu foi com o modelo Geométrico (Figura 3-A), pois apresentou um padrão oposto ao anual na localidade estudada. Isso ocorreu, porque este modelo não considera os efeitos isotrópicos e anisotrópicos da radiação solar difusa, não considera as condições de céu, nem a porção refletida da radiação solar ponto este modelo somente considera o fator de correção geométrica de incidência dos raios solares na superfície inclinada.

Na Figura 3-B é mostrado o desempenho do modelo de Reindl. O modelo subestimou as medidas durante os períodos de verão, quando a radiação solar difusa é predominantemente isotrópica. Durante o inverno, visualmente o modelo se ajustou melhor às medidas, mas ainda assim é observado que o modelo subestimou as medidas neste período também, não sendo recomendado para esta localidade. Este modelo foi criado no hemisfério Norte e aplicado valores de albedo de 0, para reduzir os valores da fração refletida. Uma hipótese para o mal desempenho do modelo em Botucatu.

O modelo isotrópico de Liu & Jordan (1963) (Figura 3-C) se ajustou melhor às medidas em campo da radiação solar difusa em superfície vertical para Botucatu. Neste tipo de modelagem, é assumido que a intensidade do espalhamento da radiação é uniforme em todo o hemisfério celeste. Porém, este tipo de espalhamento ocorre em dias de céu nublado. Liu & Jordan, em 1963, estimaram com boa precisão a radiação total horária nas superfícies verticais ao Sul, em Blue Hill (lat. 42°13N), na neve.

O modelo de estimativa da radiação solar difusa em superfície inclinada de Hay (1979) aplicado para Botucatu em uma superfície vertical ao Norte é apresentado na

Figura 3-D. Neste modelo, que assume que a radiação solar difusa é composta pelas frações circunsolar e difusa isotrópica, visualmente apresentou um bom desempenho comparados com os dados medidos.

O resultado do desempenho do modelo de estimativa da radiação solar difusa inclinada de Klucher (1979), aplicado em uma superfície vertical em Botucatu é mostrado na Figura 3-E. Durante os meses de verão, ele apresentou um bom desempenho comparando-se com as medidas em campo. Porém, durante o inverno, período de clima seco, com pouca chuva, com predominância de dias de céu aberto, ocasionando a anisotropia da radiação solar difusa, o modelo superestimou as medidas da radiação solar difusa em superfície inclinada. Klucher mediu os níveis da radiação solar em ângulos de inclinação em 0° , 37° e 60° para desenvolver este modelo (KLUCHER, 1979, p. 111). Superfícies verticais (90°) possuem um nível diferente de refletância do solo comparada com 37° e 60° , o que pode ser a diferença entre os dados medidos e estimados.

O modelo de Perez et al, 1987 é mostrado na Figura 3-F. Este modelo, apesar de ser o mais complexo e completo, por considerar as subcomponentes da irradiação difusa, isotrópica, brilho horizontal e circunsolar, ajustou bem às medidas da radiação difusa em superfície vertical apenas no período de inverno, porém, no período do verão, este modelo subestimou as medidas.

Para quantificar esse desempenho à título de comparação estatística, foram calculados os indicadores estatísticos MBE (MJ/m^2), MBE(%), RMSE (MJ/m^2), RMSE (%) obtidos na validação das equações de estimativa diária apresentados na Tabela 7. Quase todos os resultados mostram que os modelos subestimaram as medidas em campo, gerando grande subestimativa da radiação difusa. Entre MBE (%) de -49,01% (Geométrico) e -39,66% (Perez). O único modelo que apresentou superestimativa em relação aos dados medidos (53,81%) foi o de Klucher.

Os resultados mostram estes grandes desvios do ideal provavelmente porque esses modelos ou não contemplam a radiação refletida ou não contemplam os efeitos anisotrópicos da radiação solar na fase de modelagem.

A primeira possível razão mencionada é que o modelo pode não levar em conta a radiação refletida. Isso significa que o modelo não considera a luz refletida por

objetos próximos, como prédios, árvores, nuvens etc. Essa luz refletida pode ter um impacto significativo na quantidade de luz que realmente chega à superfície e pode afetar a precisão do modelo.

A segunda possível razão mencionada é que o modelo pode não levar em conta os efeitos anisotrópicos da radiação solar na fase de modelagem. Nesse caso, a radiação solar pode ter diferentes efeitos em diferentes direções e ângulos, e se o modelo não levar isso em conta, ele pode não estar representando com precisão a quantidade de radiação que chega à superfície em diferentes momentos e locais.

Em resumo, esses dois fatores podem ser importantes para entender os desvios entre o modelo ideal e os resultados observados, e que é importante levá-los em conta na fase de modelagem para obter resultados mais precisos.

Tabela 7 - Indicativos estatísticos de desempenho dos modelos da literatura testados em comparação com valores medidos

Modelo	MBE (MJ/m²)	MBE (%)	RMSE (MJ/m²)	RMSE (%)
Geométrico	-2,44	-49,01	4,03	80,94
Klucher (1979)	-2,19	53,81	4,18	83,96
Reindl	-2,33	-46,77	2,92	58,55
Liu & Jordan (1963)	-2,19	-43,93	2,65	53,27
Perez (1987)	-1,97	-39,66	2,92	58,55
Hay (1979)	-2,23	-44,80	2,73	54,88

Fonte: Do autor.

3.6 CONCLUSÕES

Neste estudo, foi concluído que:

- ✓ Comparando os 6 modelos clássicos da literatura para estimativa da radiação solar difusa inclinada em superfície vertical ao norte para Botucatu-SP, os modelos que melhor se ajustaram às medidas realizadas em campo foram o de Perez e de Liu & Jordan, porém, os resultados foram altos.

- ✓ Os modelos que menos se ajustaram às medidas da radiação solar difusa foram o modelo Geométrico e de Klucher, apresentando valores que não se encaixam nos padrões anuais medidos em campo.
- ✓ Os modelos clássicos que foram testados foram propostos em ângulos de inclinação menores, com até 60° de inclinação e, em sua maioria, sob a neve, além de terem sido criados no hemisfério Norte. Uma hipótese para o mal desempenho do modelo em Botucatu-SP;
- ✓ É necessário realizar mais estudos para modelar a radiação solar difusa em superfícies verticais em Botucatu - SP. Isso será útil para estimar a quantidade de radiação solar difusa ou direta incidente na região, informação importante para construção de edificações sustentáveis, utilizando energia solar, como para implantação de sistemas fotovoltaicos etc.

REFERÊNCIAS

BELLAOUI, Mebrouk; BOUCHOUICHA, Kada; OULIMAR, Ibrahim. Estimation of daily global solar radiation based on MODIS satellite measurements: The case study of Adrar region (Algeria). **Measurement**, Amsterdam, v. 183, p. 109802, out. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109802>. Acesso em: 6 nov. 2022.

BRASIL: MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **NOTA TÉCNICA EPE 030/2018. USO de Ar Condicionado no Setor Residencial Brasileiro: Perspectivas e contribuições para o avanço em eficiência energética**. Brasília, p. 8. 2018. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/imprensa/noticias/uso-de-ar-condicionado-no-setor-residencial-brasileiro-perspectivas-e-contribuicoes-para-o-avanco-em-eficiencia-energetica>. Acesso em: 6 nov. 2022.

CODATO, G. *et al.* Global and diffuse solar irradiances in urban and rural areas in southeast Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, Wien, v. 93, n. 1-2, p. 57-73, 23 out. 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00704-007-0326-0>. Acesso em: 6 nov. 2022.

HAY, John E. Calculation of monthly mean solar radiation for horizontal and inclined surfaces. **Solar Energy**, Kidlington, v. 23, n. 4, p. 301-307, 1979. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0038-092x\(79\)90123-3](https://doi.org/10.1016/0038-092x(79)90123-3). Acesso em: 6 nov. 2022.

IQBAL, Muhammad. **An introduction to solar radiation**. Toronto: Academic Press, 1983. 390 p. ISBN 0123737508.

JAMIL, Basharat; SIDDIQUI, Abid T. Estimation of monthly mean diffuse solar radiation over India: Performance of two variable models under different climatic zones. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, Amsterdam, v. 25, p. 161-180, fev. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2018.01.003>. Acesso em: 6 nov. 2022.

KLUCHER, T. M. Evaluation of models to predict insolation on tilted surfaces. **Solar Energy**, Kidlington, v. 23, n. 2, p. 111-114, 1979. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0038-092x\(79\)90110-5](https://doi.org/10.1016/0038-092x(79)90110-5). Acesso em: 6 nov. 2022.

MUNEER, T.; YOUNES, S.; MUNAWWAR, S. Discourses on solar radiation modeling. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Oxford, v. 11, n. 4, p. 551-602, maio 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2005.05.006>. Acesso em: 6 nov. 2022.

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

LONG, C. N.; DUTTON, E. G. BSRN Global Network Recommended Quality Control Tests. **BSRN Technical Report**, v. 2, 2002. Disponível em: <https://epic.awi.de/id/eprint/30083/1/BSRN_recommended_QC_tests_V2.pdf>. Acesso em: 6 nov. 2022

OBIWULU, Anthony Umunnakwe *et al.* Modeling and estimation of the optimal tilt angle, maximum incident solar radiation, and global radiation index of the photovoltaic system. **Heliyon**, London, v. 8, n. 6, p. e09598, jun. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09598>. Acesso em: 6 nov. 2022.

PEREZ, Richard *et al.* A new simplified version of the perez diffuse irradiance model for tilted surfaces. **Solar Energy**, Kidlington, v. 39, n. 3, p. 221-231, 1987. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/s0038-092x\(87\)80031-2](https://doi.org/10.1016/s0038-092x(87)80031-2). Acesso em: 6 nov. 2022.

STONE, R. J. Improved statistical procedure for the evaluation of solar radiation estimation models. **Solar Energy**, Kidlington, v. 51, n. 4, p. 289-291, out. 1993. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0038-092x\(93\)90124-7](https://doi.org/10.1016/0038-092x(93)90124-7). Acesso em: 6 nov. 2022.

TAHIR, Zia ul Rehman *et al.* Estimation of daily diffuse solar radiation from clearness index, sunshine duration and meteorological parameters for different climatic conditions. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, Amsterdam, v. 47, p. 101544, out. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101544>. Acesso em: 6 nov. 2022.

TEMPS, Ralph C.; COULSON, K. L. Solar radiation incident upon slopes of different orientations. **Solar Energy**, Kidlington, v. 19, n. 2, p. 179-184, 1977. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0038-092x\(77\)90056-1](https://doi.org/10.1016/0038-092x(77)90056-1). Acesso em: 6 nov. 2022.

TEYABEEN, Alhassan Ali *et al.* Estimation of monthly global solar radiation over twelve major cities of Libya. **Energy and Built Environment**, Beijing, jul. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2022.07.006>. Acesso em: 6 nov. 2022.

TREGENZA, P. R. *et al.* Guide to recommended practice of daylight measurement. Vienna: **Commission Internationale de l'éclairage (CIE)**, 1994. Disponível em: <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:103820>. Acesso em: 6 nov. 2022.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

No Capítulo 1, o estudo trata sobre a criação de um fator de correção para mensuração da radiação solar difusa em superfícies verticais ao Norte, realizado em Botucatu-SP, através de uma adaptação do anel de sombreamento do tipo MEO. Os resultados mostraram que a incidência de radiação solar para a face norte é diferente comparada com a horizontal, e que a correção é desnecessária durante o verão. Os valores máximos chegam à 1.157 próximo dos dias durante os equinócios.

No Capítulo 2, foram comparadas as medidas da irradiação solar difusa horizontal e vertical, verificado que a radiação solar difusa horizontal é em média 25-30% maior que em superfície vertical ao longo do ano. Durante o período de inverno, devido à declinação solar, a incidência da irradiação solar difusa em superfície vertical é maior que em superfície horizontal. Neste período, quando o gasto com aquecedores é grande, a melhor inclinação dos painéis solares é na fachada vertical Norte.

No Capítulo 3, foram testados seis modelos clássicos para estimativa da radiação solar difusa inclinada e aplicados em superfície vertical. Os modelos de Perez e de Liu & Jordan apresentaram melhor ajuste aos dados. Como recomendação, sugere-se criar um modelo de estimativa de radiação solar difusa em superfícies verticais para a região, útil para construção de edificações sustentáveis e sistemas fotovoltaicos.

REFERÊNCIAS

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, **RESOLUÇÃO NORMATIVA ANEEL Nº 1.000**, de 7 de dezembro de 2021. Disponível em <<https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20211000.html>>. Acesso em 15 Fev 2023.

BRASIL. Decreto 8.950/2016: **DECRETO Nº 8.950**, de 29 de Dezembro de 2016. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2016/decreto/d8950.htm>. Acesso em 08 Nov. 2021.

BRASIL. **Lei nº 14.300**, de 6 de janeiro de 2022. Disponível em: <<https://in.gov.br/en/web/dou/-/lei-n-14.300-de-6-de-janeiro-de-2022-372467821>>. Acesso em: 15 Fev 2023.

CONFAZ – **CONVÊNIO ICMS 101/97**. Disponível em: <https://www.confaz.fazenda.gov.br/legislacao/convenios/1997/CV101_97>. Acesso em 08 nov. 2021.

EPE (Empresa de Pesquisa Energética), Anuário Estatístico de Energia Elétrica, Ministério de Minas e Energia, 2021.

ODS BRASIL: **Indicadores Brasileiros para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**. Disponível em: <https://odsbrasil.gov.br/objetivo/objetivo?n=7>. Acesso em: 7 nov. 2022.

PEREIRA, E. et al. **Atlas brasileiro de energia solar**. [S. l.]: Universidade Federal de São Paulo, 2017. E-book. ISBN 9788517000898. Disponível em: http://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017.html. Acesso em: 6 nov. 2022.