

STEFESON BEZERRA DE MELO

**MODELAGEM DA IRRADIÂNCIA SOLAR GLOBAL PARA A REGIÃO DE
MOSSORÓ-RN**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

**VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2009**

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

M528m
2009

Melo, Stefeson Bezerra de, 1981-

Modelagem da irradiância solar global para a região de
Mossoró – RN / Stefeson Bezerra de Melo. – Viçosa, MG,
2009.

vii, 97f: il. (algumas col.) ; 29cm.

Inclui apêndices.

Orientador: Sérgio Zolnier.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 61-66.

1. Irradiação - Modelos matemáticos. 2. Energia solar.
3. Análise multivariada. I. Universidade Federal de Viçosa.
II. Título.

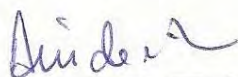
CDD 22.ed. 551.5271

STEFESON BEZERRA DE MELO

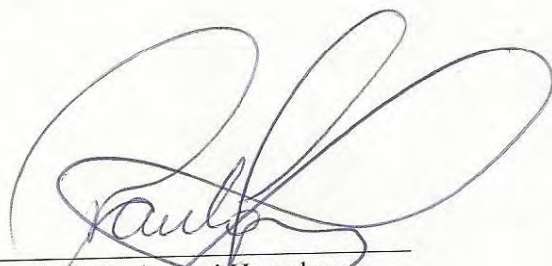
MODELAGEM DA IRRADIÂNCIA SOLAR GLOBAL PARA A REGIÃO DE
MOSSORÓ-RN

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Viçosa, como
parte das exigências do Programa de
Pós-Graduação em Meteorologia
Agrícola, para obtenção do título de
Magister Scientiae.

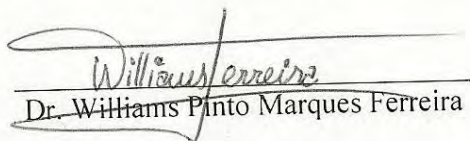
APROVADA: 12 de março de 2009.



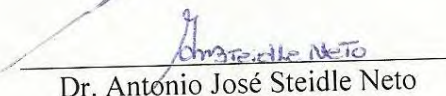
Prof. Aristides Ribeiro
(co-orientador)



Prof. Paulo José Hamakawa



Dr. Williams Pinto Marques Ferreira



Dr. Antonio José Steidle Neto



Prof. Sérgio Zolnier
(Orientador)

..... não vim ao mundo para ser pedra (Macunaíma)

AGRADECIMENTOS

A DEUS, por tudo que tem me proporcionado, e irá ainda proporcionar.

A minha família que sempre me deu forças em todos os estágios da vida.

À Universidade Federal de Viçosa, por meio do programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, pela oportunidade de realização do curso.

À Universidade Federal Rural do Semi-Árido e a Pró-Reitora de recursos humanos da UFERSA, em especial a Alvanete Pereira, pela ajuda, amizade e empenho na minha liberação, e aos Professores Porto Filho e José Espínola pela amizade e apoio.

Ao Professor Sérgio Zolnier pela orientação, discussões, críticas e sugestões durante o decorrer do trabalho.

A Fundação de Amparo a Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG), pela concessão da bolsa de estudo durante o início do curso.

Aos Professores Aristides Ribeiro e Flávio Justino, pela co-orientação, pelas críticas e sugestões.

Aos meus amigos de república Gustavo Sessa, Marco Dell’Orto, André Mattedi, Mariano e Dona Rita, pelos momentos de alegria e descontração, pelo companheirismo e pela convivência na mesma casa durante o período em Viçosa.

Aos meus amigos Marcelo Cid, Marcos Wanderley, Maria Emília e Thieres George pelo companheirismo, apoio e amizade que proporcionaram muitos churrascos, discussões e conversas que tornaram a vida em Viçosa mais alegre.

Aos amigos de Turma Viviane Gomes e Geraldo Magela e também a Dayene Schiavon pelo apoio e companheirismo, muitos obrigado por todos os maravilhosos momentos vividos.

À turma da pós-graduação em Meteorologia Agrícola, pelos muitos momentos de convivência e companheirismo. Em especial, a Anailton, Jeferson e Hudson.

Enfim, a todos que colaboraram diretamente ou indiretamente para conclusão deste trabalho.

BIOGRAFIA

STEFESON BEZERRA DE MELO, filho de Maria da Conceição Bezerra e Edivan Alberto de Melo, nasceu em 18 de janeiro de 1981, na cidade de Fortaleza, CE.

Em 1998 concluiu seu curso de técnico em contabilidade pela Escola Estadual Juscelino Kubitschek, e em 2002, iniciou o Curso de Agronomia na Escola Superior de Agricultura de Mossoró (ESAM), hoje Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA) onde atuou como monitor de Estatística e bolsista de iniciação científica. No mesmo ano, ingressou no curso de Matemática na Universidade do Estado do Rio Grande do Norte (UERN), onde atuou como monitor de Álgebra linear I e bolsista de iniciação científica, graduando-se em Agronomia em janeiro de 2007 e Matemática em maio de 2006.

Em março de 2007, ingressou no Programa de Pós-Graduação, em nível de Mestrado, em Meteorologia Agrícola, com área de concentração em Climatologia Agrícola, da Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa-MG, submetendo-se à defesa de dissertação em 12 de março de 2009.

SUMÁRIO

	Página
RESUMO.....	vi
ABSTRACT.....	vii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	3
2.1. Local de estudo	3
2.2. Estimativa da irradiância solar global (R_g).....	4
2.3. Modelos de irradiância solar global (R_g).....	5
2.4. Métodos de comparação dos modelos	7
3. MATERIAL E MÉTODOS	8
3.1. Local e dados.....	8
3.2. Irradiância solar global horária no topo da atmosfera (R_{oh}).....	8
3.3. Irradiância solar global no topo da atmosfera (R_o).....	9
3.4. Modelos de estimativa da irradiância solar global.....	10
3.4.1. Modelo multiplicativo.....	10
3.4.2. Modelo de Allen.....	11
3.4.3. Modelo Hargreaves	11
3.4.4. Modelo Chen.....	11
3.4.5. Modelo Angström	12
3.4.6. Modelo Bahel	12
3.4.7. Modelo Swartman e Ongulade.....	12
3.4.8. Modelo Ododo	13
3.4.9. Análise de Componentes Principais.....	13
3.5. Análise estatística e comparação dos modelos.....	14
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	16
4.1. Análise horária da irradiância solar global.....	16
4.2. Análise diária da irradiância solar global.....	33
4.3. Análise mensal da irradiância solar global.....	46
5. CONCLUSÕES.....	60
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	61
APÊNDICE.....	68

RESUMO

MELO, Stefeson Bezerra de, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, março de 2009. **Modelagem da irradiância solar global para a região de Mossoró-RN.** Orientador: Sérgio Zolnier. Co-orientadores: Aristides Ribeiro e Flávio Barbosa Justino.

Dados de irradiância solar global são utilizados em diversas áreas do conhecimento tais como: engenharia, agricultura, setor da saúde, energia e em muitas outras áreas. A intensidade da irradiância que atinge o topo da atmosfera pode ser estimada. Entretanto, após sua interação com atmosfera, os valores medidos, em um determinado ponto sobre a superfície da Terra, são de natureza variável. A causa deve-se à absorção seletiva dos gases que compõem a atmosfera, a reflexão e ao espalhamento, presença de nuvens e poeira, drasticamente, os valores totais que atingem a superfície terrestre. Deste modo, existem duas formas de obtenção de dados de irradiância solar global ao nível do solo: por medição ou estimativas. O objetivo deste estudo foi determinar os parâmetros de modelos matemáticos para estimativa da irradiância solar na região de Mossoró-RN e, posteriormente, avaliar o desempenho estatístico destes modelos, visando sua aplicação na agricultura e no setor de engenharia quando ocorrerem eventuais panes nos sistemas de medição. Nesse sentido, foram utilizados dados horários de irradiância solar global, temperatura do ar, umidade relativa do ar da estação meteorológica automática da Universidade Federal Rural do Semi-árido – UFRSA, e dados de duração diária de brilho solar da estação do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET, correspondentes ao período de 2000 a 2007. Para determinação dos parâmetros dos modelos, foram utilizados dados do período de 2000 a 2003, enquanto os testes foram realizados a partir de dados de 2004 a 2007. A análise horária, tendo a temperatura como principal variável independente, demonstrou que os modelos avaliados tiveram a tendência de subestimar a irradiância durante a manhã e de superestimá-la à tarde, com os valores do índice de concordância de Willmott (índice “d”) acima de 0,90. Para as estimativas diárias, verificou-se que os modelos de Angström, Bahel, Swartman e Ongulade, Ododo (a), Ododo (b) e Chen (b) proporcionaram os melhores resultados para o mês de abril (mais chuvoso), enquanto que os modelos de Allen e Multiplicativo alcançaram melhores resultados para o mês de outubro, caracterizado por temperaturas mais elevadas. Os resultados para os dados mensais demonstraram que a análise de componentes principais foi eficiente para a estimativa da irradiância solar global, exceto para os meses de março e abril em que houve diferença significativa entre os dados observados e estimados.

ABSTRACT

MELO, Stefeson Bezerra de, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, March, 2009.
Modeling the global solar irradiance for the region Mossoró-RN. Adviser: Sérgio Zolnier. Co-advisers: Aristides Ribeiro and Flávio Barbosa Justino.

Global solar irradiance data are used in several areas of knowledge such as engineering, agriculture, health sector, energy and many other areas of natural sciences. The intensity of light that reaches the top of the Earth's atmosphere can be estimated. However, after its interaction with air, measured values at a given point on Earth's surface is a variable. The main cause is due to selective absorption of various gases that make up the atmosphere, reflection and scattering, presence of clouds and dust that affect, total amounts that reach the earth's surface. Thus, there are two ways of obtaining data of global solar irradiance at ground level: by measurement or estimation. The aim of this study was to determine the parameters of mathematical models to estimate the global solar irradiance in the Mossoró-RN region, and subsequently evaluate the performance of these statistical models, to its application in agriculture and engineering sector where possible gaps occur in systems of measurement. Accordingly, were used hourly data of global solar irradiance, air temperature, relative humidity obtained in the automatic weather station of University of the Semi-arid and sunshine duration of the weather station of the National Institute of Meteorology - INMET, corresponding the period 2000 to 2007. To determine the parameters of the models, we used data from the period 2000 to 2003 while tests were made from data from 2004 to 2007. The hourly analysis had air temperature as the main independent variable, showed that all models evaluated had a tendency to underestimate the irradiance during the morning and overestimates it in the afternoon, with the values of the index of agreement of Willmott (index "d") over 0.90. For daily estimates, it was found that the models of Ansgtröm, Bahel, Swartman and Ongulade, Ododo (a), Ododo (b) and Chen (b) provided the best results for the month of April (more rain), while the models of Allen and multiplying achieved the best results for the month of October, characterized by higher temperatures. The results for the monthly data showed that the principal components analysis was effective for the estimation of global solar irradiance, except for the months of March and April when there were significant differences between the observed and estimated data.

1. INTRODUÇÃO

O uso dos dados de irradiância solar são importantes para uma ampla gama de aplicações, como por exemplo, na engenharia, agricultura, setor da saúde, e em muitas outras áreas de ciências naturais. A diversidade de aplicações podem incluir: arquitetura e dimensionamento, construção de sistemas de ar condicionado e refrigeração, sistema de aquecimento solar, previsão do tempo, utilização em modelos, evaporação e irrigação, cálculo das necessidades hídricas das culturas agrícolas, acompanhamento do crescimento das plantas e de controle de doenças, até a investigação do câncer de pele (BADESCU, 2008).

Deste modo, existem duas formas de obtenção de dados da irradiância solar ao nível do solo: por medição ou estimativa.

Nos últimos séculos, os tipos e magnitudes das necessidades energéticas têm aumentado em uma forma sem precedentes e a humanidade procura fontes de energia adicionais. Hoje, a energia é a força motriz para o futuro contínuo de desenvolvimentos sociais e tecnológicos. Fontes de energia são vitais para todas as atividades humanas e sem isso não há progresso, soma-se a isso o crescimento da população atual que sobe a uma taxa média de 2% que provoca uma pressão extra sobre fontes limitadas de energia (SEN, 2008).

A energia solar é a fonte mais antiga de energia, diversos dispositivos foram e são criados para seu aproveitamento, e não só a energia que vem do sol, mas também a eólica (navegação e moinhos) e hídrica (hidroelétricas).

Desde a primeira crise do petróleo, na década de 70, o interesse por novas fontes de energia tem aumentado de maneira significativa, e assim o uso da irradiância solar como fonte de energia desempenha papel significativo em todo o mundo.

Os estudos sobre a irradiância solar tornaram-se uma questão importante para as energias renováveis, provocando um aumento da necessidade de medições confiáveis da irradiância solar na superfície (KUDISH e IANETZ, 1992; DUCHON e O'MALLEY, 1999; ZWEIBEL et al., 2008).

Esse e outros acontecimentos deram origem a trabalhos sobre a exploração ótima dos recursos naturais, a taxa desejável de investigação, desenvolvimento e esforços para promover as tecnologias competitivas (TSUR e ZEMEL, 1998). Há também uma grande quantidade de literatura sobre gerenciamento de energia em função dos processos de poluição atmosférica e mudanças climáticas (EDMONDS e REILLY, 1993; HOEL e KVENDOKK, 1996; NORDHAUS, 1997 e WEYANT, 1993).

A compreensão climatológica da irradiância solar é relativamente nova. Assim, é importante a compreensão da natureza física da irradiância solar, e em especial, determinar a quantidade de energia interceptada pela superfície da terra, que é utilizada pela plantas na fotossíntese e evapotranspiração, na relação solo-vegetação-atmosfera (MUNEER, 2004).

A influência da energia radiante na fotossíntese, evapotranspiração, propagação de doenças e pragas agrícolas, conforto ambiental de animais e plantas têm sido amplamente difundida (DOORENBOS e PRUITT, 1977; MARISCAL et al., 2000; PEREIRA et al., 1997; SOUZA e ESCOBEDO, 1997) e dados de irradiância solar também abrangem o uso na validação de modelos de circulação geral (GARRATT, 1994; HANSEN, 1999).

Nesse contexto, o Semi-árido brasileiro que possui alta incidência de irradiância solar durante todo o ano, e portanto tem potencial e pré-requisitos necessários para o aproveitamento dessa energia. E assim, a utilização de modelos que estimem com precisão e exatidão a irradiância solar incidente na superfície terrestre é uma alternativa adequada e viável a esse propósito.

Diante das considerações apresentadas, o presente trabalho tem como objetivo os determinar os parâmetros de modelos matemáticos para estimativa da irradiância solar na região de Mossoró-RN e, posteriormente, avaliar o desempenho estatístico destes modelos, visando o preenchimento de discontinuidades de séries climatológicas, e sua aplicação na agricultura e no setor de engenharia quando ocorrerem eventuais paneiros nos sistemas de medição.

2.REVISÃO DE LITERATURA

2.1.Local de estudo

O Semi-árido brasileiro é caracterizado por ter alta disponibilidade de energia solar e pouca precipitação pluviométrica, ocupando área de 841.260 km², correspondentes a 53,9% da região Nordeste e outros 54.670 km² no norte de Minas Gerais. A região do Semi-árido é composta de 1.031 municípios que estão distribuídos entre os estados de Alagoas, Bahia, Ceará, Paraíba, Pernambuco, Piauí, Rio Grande do Norte, Sergipe e Norte de Minas Gerais (IBGE, 2000).

Também no Semi-árido está o município de Mossoró (Figura 1), situada no extremo oeste potiguar, sendo o segundo município mais importante do estado do Rio Grande Norte e umas das mais expressivas do Nordeste. Responsável por boa parte da extração de petróleo em continente, Mossoró se destaca na produção de sal, carcinicultura e fruticultura tropical para exportação. Devido à sua proximidade com um deserto salino e latitude de 5° ao Sul do equador, apresenta-se como uma das cidades mais quentes do país com alta incidência de irradiância solar o ano todo.

O instituto de defesa do meio ambiente do estado do Rio Grande Norte – IDEMA caracterizou que o município de Mossoró está inserido na região homogênea climática Mossoroense (IDEMA, 2001), e ARAÚJO FILHO (2005) também considerou a região homogênea em estudo realizado para caracterização do regime de chuvas e do índice de secas de Palmer para todo o estado.

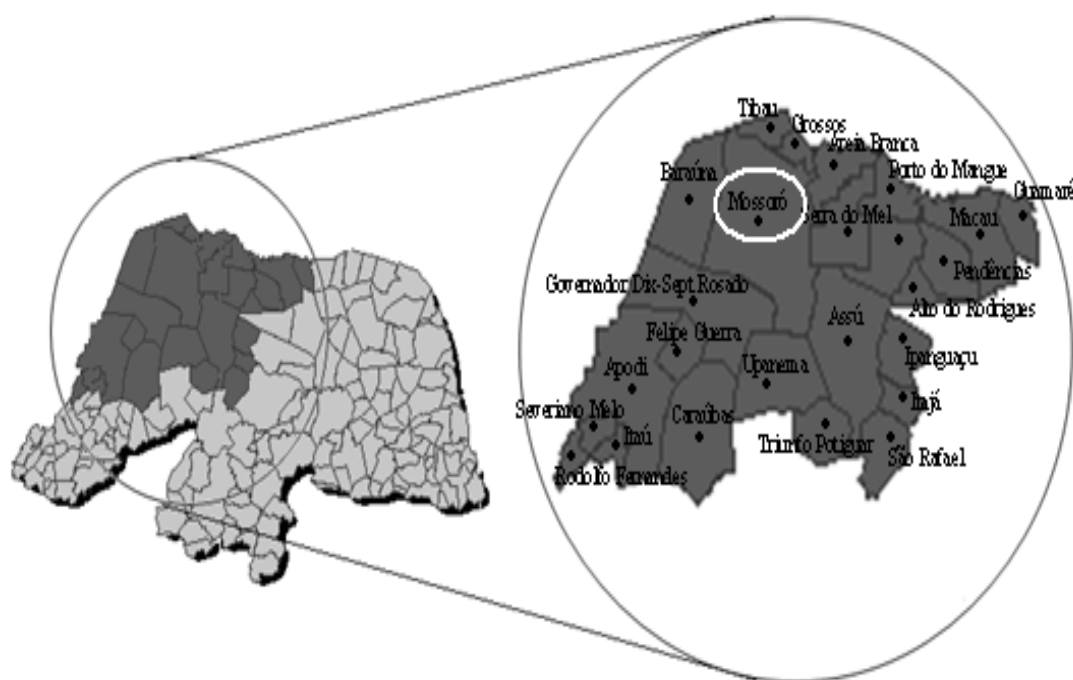


Figura 1. Município de Mossoró, situado na região homogênea climática Mossoroense, do Rio Grande do Norte. (IDEMA, 2001).

2.2. Estimativa da irradiância solar global (R_g)

O levantamento da disponibilidade de energia solar à superfície pode ser feito por meio de medições diretas, a partir de piranômetros. Entretanto, apenas recentemente os órgãos oficiais tem substituído as estações convencionais por automáticas que efetivamente registram a densidade de fluxo da irradiação solar. Assim, estudos sobre o potencial de uso da irradiância solar, dentre outras, é importante, especialmente no nordeste onde se observa a menor densidade de estações automáticas. Uma alternativa para superar tal impasse é o uso de modelos teóricos, ajustados para o local de interesse (TIBA, 2000; NICÁCIO, 2002; DANTAS et al., 2003).

Neste caso, a radiação solar global pode ser alternativamente estimada a partir de outras variáveis climáticas, tal como duração do período diurno (BOISVERT et al., 1990; SOLER, 1990; RIETVELD, 1978; ANGSTRÖM, 1924), extremos de temperatura (DE JONG e STEWART, 1990; HARGREAVES et al., 1985; BRISTOW e CAMPBELL, 1984), precipitação (DE JONG e STEWART, 1990) e

cobertura de nuvens (BARKER, 1992; DAVIES e MCKAY, 1988; BRINSFIELD et al., 1984).

Muitos estudos foram conduzidos com modelos matemáticos empíricos, podendo-se citar ABRAHA e SAVAGE (2008) que simularam a irradiância solar global a partir de extremos de temperaturas do ar para utilizá-los como dados de entrada em modelos de estimativa de massa seca do milho, ALMOROX et al., (2005) que estimaram os parâmetros “a” e “b” do modelo de Angström para a cidade de Toledo na Espanha a partir de dados diários, e finalmente, TRNKA et al., (2005) que avaliaram sete modelos para estimar a radiação solar global para a Europa Central.

CHINEKE (2008) utilizou modelos de estimativa de radiação solar para algumas localidades da Nigéria, recomendando modelos que necessitam apenas de dados de temperatura máxima e mínima para zona rural, onde não há disponibilidade de dados de insolação. Em contraste, quando estes dados estão disponíveis, o autor recomenda o uso modelo de Angström que proporcionou bons resultados.

CONCEIÇÃO e MARIN (2007) avaliaram dois modelos baseados na temperatura do ar para quatro localidades, sendo duas no sudeste e duas nordeste com coeficiente de determinação (r^2) médio para os modelos variando de 0,61 a 0,70.

GUISELINI et al. (1999) estudaram as instalações rurais e urbanas para dimensionamento de sombreamento. Outros estudos tem merecido destaque como os da avaliação horária de aplicação de herbicidas, ou mesmo de inseticidas, em que a radiação solar influencia consideravelmente na volatilização e na absorção dos ingredientes ativos por parte das plantas, podendo reduzir drasticamente a eficiência desses defensivos, causando enormes prejuízos (PENCKOWSKI et al., 2003).

COSTA et al. (2004) utilizaram dados horários de radiação solar para simular a umidade relativa e temperatura dentro de estufa agrícola, já que estes são elementos meteorológicos fundamentais no desenvolvimento das plantas nesses locais.

2.3. Modelos de irradiância solar global (R_g)

Diversos modelos são encontrados na literatura para estimativa da irradiância solar global, que se utilizam de elementos meteorológicos (temperatura máxima e mínima do ar, umidade relativa, nebulosidade) como variáveis de entrada, dentre eles podemos citar os modelos de ANGSTRÖM (1924), SWARTMAN e OGUNLADE

(1967), HARGREAVES et al., (1985), BAHREL et al. (1987), ODODO et al., (1995), ALLEN (1997), CHEN et al., (2004).

JARVIS (1976) apresentou o modelo multiplicativo e coloca como a principal vantagem do método, identificar os efeitos isolados de cada variável independente, a partir de funções adimensionais, que posteriormente serão combinadas para gerar o modelo multiplicativo. Este método tem sido utilizado por distintos autores, principalmente para avaliação do efeito isolado das variáveis meteorológicas na resistência estomática das plantas (JARVIS, 1976; ZOLNIER et al., 2001; HAMER, 1997). Além disso, também foi utilizado por SILVA et al., (2007) para estimativa da umidade relativa do ar a partir de componentes do balanço hídrico.

SEN e CEBECI (2008) propuseram a análise de componentes principais (ACP) para estimativa da R_g , e indica como benefícios, de que os dados de entrada não estão sujeitos a restrições estatísticas como: linearidade, normalidade, média dos erros, homocedasticidade, independência.

A ACP é um método multivariado, que consiste em transformar o conjunto original de variáveis $X_1, X_2, \dots, X_n$, em um novo conjunto de variáveis $Z_1, Z_2, \dots, Z_n$ de dimensão equivalente e não correlacionados na ordem de sua importância, chamadas de componentes principais. Cada componente principal é uma combinação linear das variáveis originais, estimadas de maneira a explicar o máximo da variabilidade total dessas variáveis originais e independentes entre si (MANLY, 2008).

Logo, a ordem de importância das componentes principais fica de tal forma que $\text{Var}(Z_1) \geq \text{Var}(Z_2) \geq \dots \geq \text{Var}(Z_n)$, em que $\text{Var}(Z_i)$ denota a variância de Z_i , assim ao se realizar uma ACP espera-se que a maioria das variâncias das componentes principais sejam baixas, a ponto de serem consideradas desprezíveis e, desta forma, a maior parte da variância pode ser explicada com poucas variáveis “Z”.

Determinadas as componentes principais, os seus valores numéricos, denominados escores, podem ser calculados utilizando cada elemento amostral, e assim esses escores podem ser analisados usando-se técnicas usuais de estatística (MINGOTI, 2007).

2.4. Métodos de comparação dos modelos

De modo geral, o desempenho de modelos de Rg são avaliados com base em testes estatísticos de erros, os mais comuns são: erro médio de estimativa (MBE), a raiz quadrada do valor médio do quadrado do erro de estimativa (RMSE) e o coeficiente de correlação de Pearson (r), e o índice de concordância de Willmott (d) (WILLMOTT et al., 1985).

O MBE fornece informações sobre o desempenho a longo prazo, assim um baixo MBE é desejado. Um valor positivo dá a quantidade média de superestimativa de uma observação individual, que cancelará uma subestimativa em uma observação separada.

Já as informações fornecidas pelo RMSE é sobre o desempenho à curto prazo das correlações permitindo a comparação termo a termo dos desvios entre os valores observados e os calculados. Dessa maneira, quanto menor o valor do desvio, melhor é o desempenho do modelo. No entanto, alguns grandes erros na soma pode produzir um aumento significativo do RMSE. Foi utilizado o coeficiente de correlação de Pearson para testar a relação linear entre os valores medidos e calculados

O índice de concordância de Willmott (d) é utilizado para verificar a exatidão do modelo e, conforme FERREIRA (2008), visa a avaliação do desempenho do modelo para a estimativa da irradiância solar, comparando entre a metodologia proposta e os valores efetivamente observados.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Local e dados

O trabalho foi desenvolvido a partir de dados observados na Estação Meteorológica Automática da Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA, situada no município de Mossoró, Estado do Rio Grande do Norte. Dados horários de irradiância solar global, foram medidos por um piranômetro do tipo Eppley, modelo Precision Spectral Pyranometer (PSP), temperatura máxima e mínima do ar a 1,5m e umidade relativa do ar por sonda modelo QMH102 (VAISALA). A duração diária de brilho solar foi medida no período de 2000 a 2007 na estação meteorológica convencional pertencente ao Instituto Nacional de Meteorologia – INMET localizada nas coordenadas geográficas 5°11'31"S e 37°20'40" W e 18m acima do nível do mar.

3.2. Irradiância solar global horária no topo da atmosfera (R_{oh})

A irradiância solar global horária no topo da atmosfera (R_{oh}) foi calculada como uma função da constante solar ($S_o=1367 \text{ Wm}^{-2}$) conforme, fator de correção, associado a excentricidade da órbita da terra (E_o), latitude (ϕ), declinação solar (δ), ângulo horário (w_s), (θ) ângulo zenital de acordo com a expressão dada por IQBAL (1983).

$$R_{oh} = S_o E_o \cos(\theta) \quad (1)$$

em que,

$$E_o = 1 + 0,033 \cos(2\pi n_d / 365) \quad (2)$$

$$\cos(\theta) = \sin(\phi) \sin(\delta) + \cos(\phi) \cos(\delta) \cos(w_s) \quad (3)$$

em que w_s é dado por,

$$w_s = 15 (t - M) (l_l - l_p) \quad (4)$$

em que, t é o horário local, M o horário ao meio dia, l_l é a longitude local e l_p a longitude padrão (meridiano de 45° oeste).

Essa metodologia foi usada para estimativa horária da Irradiância solar global dos seguintes modelos: Allen, Hargreaves, Chen e Multiplicativo.

3.3. Irradiância solar global no topo da atmosfera (R_o)

A irradiância solar global no topo da atmosfera (R_o), em $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$, foi calculada com base na duração astronômica do período diurno (N), em horas, no ângulo horário do sol (w_s), em graus, na latitude local (ϕ) e na declinação solar (δ).

A duração astronômica do período diurno é dada obtida pela seguinte equação:

$$N = \frac{2w_s}{15^\circ} \quad (5)$$

em que,

$$w_s = \arccos(-\tan \phi \tan \delta) \quad (6)$$

E conforme COOPER (1969), a declinação solar é dada por:

$$\delta = 23,45^\circ \sin \left[\frac{360^\circ (284 + n_d)}{365} \right] \quad (7)$$

em que, n_d = dia do ano ($n_d=1$, em 1º de janeiro e $n_d=365$, em 31 de dezembro).

A irradiância total sobre uma superfície horizontal (R_o), em $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$, foi calculada conforme IQBAL (1983):

$$R_o = 37,60E_o \left(\frac{\pi w_s}{180^\circ} \sin\phi \sin\delta + \cos\phi \cos\delta \sin w_s \right) \quad (8)$$

em que, “ E_o ” é o fator de correção, associado a excentricidade da órbita da terra, calculado pela equação de Spencer, dada por:

$$E_o = 1,000110 + 0,034221 \cos X + 0,001280 \sin X + 0,000719 \cos 2X + 0,000077 \sin 2X \quad (9)$$

em que, X é expresso em radianos, e dado por:

$$X = \frac{2\pi(n_d - 1)}{365} \quad (10)$$

3.4. Modelos de estimativa da irradiância solar global

Para obtenção dos coeficientes dos modelos, foram utilizados os dados de 2000 a 2003, e para validação os dados de 2004 a 2007, as análises dividiram-se em três escalas, a saber: horária, diária e mensal. Em que, na escala horária os modelos elaborados foram os Allen, Hargreaves, Chen e multiplicativo. Para estimativa diária os modelos foram o multiplicativo, Allen, Hargreaves, Chen, Angström, Bahel, Swartman e Ongulade e Ododo. Finalmente, para escala mensal foram comparados todos esses modelos com a análise de componentes principais (ACP).

3.4.1. Modelo Multiplicativo

O modelo simplificado proposto para estimativa da irradiância solar global a partir de duas variáveis é dado pela equação abaixo:

$$R_g = f(x) f(y) \quad (11)$$

em que, $f(x)$ e $f(y)$ são funções lineares ou não-lineares das variáveis meteorológicas consideradas x e y .

Neste caso, identifica-se primeiramente o efeito da variável mais importante a partir da função $f(x)$ e, em seguida, é determinado o efeito da segunda variável mais significativa a partir da função $f(y)$ que, por sua vez, é correlacionada com os resíduos não explicados pela variável $f(x)$.

3.4.2. Modelo de Allen

ALLEN (1997) propõe a estimativa da irradiância solar global (R_g) em função de valores mensais de R_o com valores temperaturas máximas e mínimas do ar ($^{\circ}\text{C}$), em que “ a ” é parâmetro do modelo.

$$\frac{R_g}{R_o} = a (T_{\max} - T_{\min})^{0,5} \quad (12)$$

3.4.3. Modelo de Hargreaves

HARGREAVES et al. (1985) apresentaram um método simples para estimar a irradiância solar global semelhante a equação de ALLEN (1997).

$$\frac{R_g}{R_o} = a (T_{\max} - T_{\min})^{0,5} + b \quad (13)$$

3.4.4. Modelo de Chen

CHEN et al. (2004) ajustaram dois modelos de regressão aos dados meteorológicos medidos em 48 estações situadas na China. As variáveis selecionadas foram temperaturas do ar máxima e mínima e a razão de duração diária de brilho solar, sendo que “ a ”, “ b ”, “ c ” e “ d ” são parâmetros dos modelos ajustados, que foram divididos em dois modelos, da seguinte forma: Chen (a) referente a equação (14) e Chen (b) referente a equação (15).

$$\frac{R_g}{R_o} = a \ln(T_{\max} - T_{\min}) + b \quad (14)$$

$$\frac{R_g}{R_o} = a \ln(T_{\max} - T_{\min}) + b \left(\frac{n}{N} \right)^c + d \quad (15)$$

3.4.5. Modelo de Angström

ANGSTRÖM (1924) sugeriu uma equação linear simples para estimar a irradiância solar global como uma função da irradiância incidente no topo da atmosfera, duração diária de brilho solar e duração astronômica do período diurno, de acordo com a seguinte equação:

$$\frac{R_g}{R_o} = a + b \left(\frac{n}{N} \right) \quad (16)$$

3.4.6. Modelo de Bahel

BAHEL et al. (1987) desenvolveram uma correlação baseada na duração diária de brilho solar e nos dados de irradiância global de 48 estações ao redor do mundo. Os autores obtiveram a equação abaixo, em que “a”, “b”, “c” e “d” são parâmetros do modelo que caracterizam a transmitância atmosférica.

$$\frac{R_g}{R_o} = a + b \left(\frac{n}{N} \right) + c \left(\frac{n}{N} \right)^2 + d \left(\frac{n}{N} \right)^3 \quad (17)$$

3.4.7. Modelo de Swartman e Ogunlade

SWARTMAN e OGUNLADE (1967) argumentam que a irradiância solar global pode ser obtida por meio de uma função não-linear que tem como dados de entrada a nebulosidade (n/N) e o valor médio diário da umidade relativa do ar (UR), sendo que os efeitos destas variáveis são ponderados pelos parâmetros “a”, “b” e “c”.

$$\frac{R_g}{R_o} = a \left(\frac{n}{N} \right)^b UR^c \quad (18)$$

3.4.8. Modelo de Ododo

ODODO et al. (1995) propuseram dois modelos para estimar a irradiância solar global diária, utilizando a temperatura máxima, a nebulosidade (n/N) e a umidade relativa média, em que “a”, “b”, “c” e “d” são parâmetros do modelo, os quais foram divididos em dois modelos a saber: Ododo (a) referente a equação (12) e Ododo (b) referente a equação (13).

$$\frac{R_g}{R_o} = a \left(\frac{n}{N} \right)^b T_{\max}^c UR^d \quad (19)$$

$$\frac{R_g}{R_o} = a + b \left(\frac{n}{N} \right) + cT_{\max} + dUR + eT_{\max} \left(\frac{n}{N} \right) \quad (20)$$

3.4.9. Análise de componentes principais (ACP)

Para escala mensal, empregou-se a análise de componentes principais (ACP), utilizando-se a matriz de covariância, já que foram ordenadas da seguinte forma: (n/N) nebulosidade e ($T_{\min}/T_{\max}$) razão dos extremos de temperaturas.

Optou-se por usar as componentes resultantes, juntamente com a análise de regressão linear múltipla, com base nos escores de Z_1 e Z_2 obtidos através da ACP (MONTGOMERY et al., 2001). Os modelos ficaram assim definidos:

$$\hat{R}_g = R_o (\beta_0 + \beta_1 Z_1 + \beta_2 Z_2) \quad (21)$$

em que , $\hat{R}_g$ é a irradiância solar global estimada em $\text{MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$, R_o é a irradiância solar no topo da atmosfera em $\text{MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$, e “ β_0 ”, “ β_1 ” e “ β_2 ” são coeficientes adimensionais da equação de regressão.

Z_1 e Z_2 são as componentes principais definidas como as funções lineares abaixo:

$$Z_1 = a_{11}(n/N) + a_{21}(T_{\min}/T_{\max}) \quad (22)$$

$$Z_2 = a_{12}(n/N) + a_{22}(T_{\min}/T_{\max}) \quad (23)$$

em que, “a₁₁”, “a₂₁”, “a₁₂” e “a₂₂” são autovetores obtidos através da ACP.

3.5. Análise estatística e comparação dos modelos

Para validação dos modelos foram utilizando os seguintes testes:

Raiz quadrada do valor médio do quadrado do erro de estimativa, dado por:

$$RMSE = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Rg_{est} - Rg_{obs})^2 \right]^{1/2} \quad (24)$$

Coefficiente de correlação de Pearson, dado por:

$$r = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (Rg_{est} - \overline{Rg_{est}})(Rg_{obs} - \overline{Rg_{obs}}) \right]}{\left[\sum_{i=1}^n (Rg_{obs} - \overline{Rg_{obs}})^2 \sum_{i=1}^n (Rg_{est} - \overline{Rg_{est}})^2 \right]^{1/2}} \quad (25)$$

Índice de concordância de Willmott, dado por:

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Rg_{est} - Rg_{obs})^2}{\sum_{i=1}^n \left(\left| Rg_{est} - \overline{Rg_{obs}} \right| + \left| Rg_{obs} - \overline{Rg_{obs}} \right| \right)^2} \right] \quad (26)$$

Erro médio de estimativa, dado por:

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Rg_{est} - Rg_{obs}) \quad (27)$$

em que, $R_{g_{obs}}$ é o valor observado da irradiância solar global horária, $R_{g_{est}}$ é o valor estimado irradiância solar global horária e n é o número total de observações.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Análise horária da irradiância solar global

Para análise horária dos modelos foi substituído a temperatura máxima do ar ($T_{\max}$), pela temperatura do horário analisado T_h . Este procedimento foi adotado para estimativa horária da irradiância solar global horária dos modelos: Allen, Hargreaves, Chen e Multiplicativo.

A validação dos modelos foi realizada por meio dos indicadores estatísticos MBE, RMSE, "r" e também do "d", com base nos dados de 2004 a 2007. Pode ser observado nas tabelas 1, 2, 3, 4 e 5 os valores dos parâmetros mensais e anuais para os modelos, bem como todas as análises estatísticas de desempenho.

Para o modelo Multiplicativo, as funções que melhor se ajustaram foram as lineares, sendo em primeiro lugar a função $f(Ro/Ro_{\max}) = a (Ro/Ro_{\max}) + b$ e em segundo lugar, $f(T_h - T_{\min}) = c (T_h - T_{\min}) + d$. Desta forma, o primeiro modelo Multiplicativo (a) foi composto como a seguir:

$$R_g = f(Ro/Ro_{\max}) f(T_h - T_{\min}) \quad (a) \quad (25)$$

em que "a", "b", "c" e "d" são coeficientes do modelo, $Ro_{\max}$ é máximo de irradiância solar no topo da atmosfera, ao meio dia, T_h é a temperatura do horário em questão, e $T_{\min}$ é a temperatura mínima do dia.

Ainda para o modelo multiplicativo, foi adicionada à equação (25) outra equação linear em função da nebulosidade definida como: $f(n/N) = e (n/N) + g$, gerando assim outro modelo, ficando composto como apresentado a seguir:

$$R_g = f (R_o/R_{o_{max}}) f (T_h - T_{min}) f(n/N) \quad (b) \quad (26)$$

em que “e”, e “g” são coeficientes do modelo, n é o duração diária de brilho solar, em horas, e N é a duração astronômica do período diurno, em horas.

As análises mensais foram divididas em dois semestres, como são mostradas nas Figuras de 2 a 11. Os períodos chuvosos de janeiro a junho e seco de julho a dezembro, retratam adequadamente o comportamento da irradiância solar na região localizada no semi-árido.

Os modelos que apenas utilizam os extremos de temperatura (Allen, Hargreaves e Chen tiveram resultados semelhantes quanto ao seu desempenho para estimativa da R_g , com índice de concordância (d) variando entre 0,90 a 0,96, e coeficiente de correlação (r) entre 0,83 e 0,93, mostrando sua eficácia na estimativa da R_g . Porém, o modelo de Chen foi ligeiramente melhor quando comparado aos outros dois.

Os modelos multiplicativos (a e b) alcançaram resultados similares ou melhores que os modelos de Allen, Hargreaves e Chen. Todavia essa melhora em termos de acurácia e precisão gira em torno de 2%, tanto para o índice de concordância (d), quanto para o “r”, para o modelo multiplicativo (b). Isso indica que o modelo multiplicativo pode ser usado para explicar o comportamento da irradiância solar horária.

É possível observar nas Tabelas de 1 a 5 que os coeficientes obtidos variam durante o ano. Essas variações são explicadas como uma consequência das variações do período climatológico na atmosfera (ALMOROX et al., 2005).

No primeiro semestre, os valores de RMSE em média foram maiores que no segundo semestre, indicando que estimativa individuais de R_g do primeiro semestre contêm mais erros do que no segundo, já que, no primeiro semestre se concentra o período chuvoso, principalmente entre Março e Maio. Este fato é atribuído, segundo DUCHON e O’MALLEY (1999) e GU (2001) às múltiplas camadas de reflexões perto das nuvens.

Tabela 1. Coeficientes mensais e anual do modelo de Allen para estimativa da irradiância solar global horária, e respectivos índices estatístico

Mês	a	desvio padrão	MBE	r	RMSE	d
Janeiro	0,2030	±0,0014	-0,0007	0,8642	0,4762	0,9282
Fevereiro	0,2047	±0,0012	0,0654	0,8536	0,5172	0,9214
Março	0,2009	±0,0013	-0,1132	0,8648	0,5167	0,9235
Abril	0,2027	±0,0014	0,0737	0,8757	0,5354	0,9321
Maio	0,2083	±0,0013	0,2047	0,8392	0,5677	0,9031
Junho	0,1926	±0,0014	0,1961	0,8669	0,4753	0,9169
Julho	0,1846	±0,0012	-0,0262	0,9018	0,3848	0,9474
Agosto	0,1886	±0,0010	-0,0406	0,9146	0,3774	0,9554
Setembro	0,1965	±0,0011	-0,0590	0,9183	0,4097	0,9570
Outubro	0,2063	±0,0011	-0,1086	0,9189	0,4072	0,9551
Novembro	0,2053	±0,0012	-0,1443	0,9022	0,4252	0,9431
Dezembro	0,1937	±0,0013	-0,2254	0,8611	0,4979	0,9080
Anual	0,1989	±0,0004	-0,0055	0,8565	0,4708	0,9331

Tabela 2. Coeficientes mensais e anual do modelo de Hargreaves para estimativa da irradiância solar global horária e respectivos índices estatístico

Mês	a	desvio padrão	b	desvio padrão	MBE	r	RMSE	d
Janeiro	0,1810	±0,0066	0,0621	±0,0181	0,0090	0,8638	0,4713	0,9273
Fevereiro	0,1975	±0,0073	0,0209	±0,0211	0,0693	0,8543	0,5141	0,9216
Março	0,2015	±0,0064	-0,0017	±0,0180	-0,1136	0,8647	0,5169	0,9235
Abril	0,2149	±0,0070	-0,0338	±0,0191	0,0736	0,8744	0,5406	0,9319
Maio	0,1020	±0,0082	0,3049	±0,0232	0,1575	0,8605	0,4921	0,9161
Junho	0,1466	±0,0090	0,1371	±0,0265	0,1882	0,8736	0,4501	0,9210
Julho	0,1366	±0,0088	0,1558	±0,0283	0,0004	0,9066	0,3749	0,9480
Agosto	0,1279	±0,0069	1,1370	±0,0140	-0,0118	0,9208	0,3589	0,9574
Setembro	0,0711	±0,0078	0,4001	±0,0247	-0,0186	0,9388	0,3505	0,9645
Outubro	0,0931	±0,0083	0,3522	±0,0256	-0,0700	0,9351	0,3543	0,9622
Novembro	0,0706	±0,0091	0,4087	±0,0273	-0,0933	0,9125	0,3827	0,9474
Dezembro	0,1237	±0,0095	0,2091	±0,0281	-0,1674	0,8626	0,4700	0,9115
Anual	0,1504	±0,0021	0,1463	±0,0062	0,0129	0,8803	0,4528	0,9347

Tabela 3. Coeficientes mensais e anual do modelo de Chen para estimativa da irradiância solar global horária e respectivos índices estatístico

Mês	a	desvio padrão	b	desvio padrão	MBE	r	RMSE	d
Janeiro	0,1888	±0,0068	0,1882	±0,0137	0,0061	0,8648	0,4681	0,9276
Fevereiro	0,2236	±0,0085	0,1236	±0,0177	0,0653	0,8586	0,5042	0,9241
Março	0,2223	±0,0071	0,1144	±0,0144	-0,1074	0,8718	0,5031	0,9279
Abril	0,2275	±0,0074	0,1055	±0,0146	0,0508	0,8819	0,5179	0,9353
Maio	0,1170	±0,0096	0,3530	±0,0198	0,1390	0,8637	0,4807	0,9182
Junho	0,1812	±0,0114	0,1818	±0,0244	0,1690	0,8753	0,4383	0,9241
Julho	0,1896	±0,0125	0,1557	±0,0289	-0,0016	0,9057	0,3762	0,9482
Agosto	0,1881	±0,0100	0,1759	±0,0234	-0,0134	0,9207	0,3590	0,9578
Setembro	0,1064	±0,0112	0,3816	±0,0255	-0,0219	0,9387	0,3502	0,9648
Outubro	0,1336	±0,0116	0,3405	±0,0259	-0,0715	0,9352	0,3541	0,9624
Novembro	0,0990	±0,0130	0,4044	±0,0284	-0,0946	0,9121	0,3835	0,9473
Dezembro	0,1687	±0,0128	0,2123	±0,0276	-0,1687	0,8623	0,4709	0,9124
Anual	0,1881	±0,0026	0,1890	±0,0055	0,0062	0,8604	0,4464	0,9368

Tabela 4. Coeficientes mensais e anual do modelo Multiplicativo (a) para estimativa da irradiância solar global horária e respectivos índices estatístico

Mês	a	desvio padrão	b	desvio padrão	c	desvio padrão	d	desvio padrão	MBE	r	RMSE	d
Janeiro	2,9098	±0,0643	-0,2677	±0,0479	0,0453	±0,0028	0,6857	±0,0201	0,0615	0,8497	0,5025	0,9191
Fevereiro	3,2337	±0,0605	-0,3715	±0,0449	0,0456	±0,0027	0,6784	±0,0220	0,1786	0,8502	0,5631	0,9126
Março	3,1119	±0,0616	-0,3696	±0,0455	0,0447	±0,0029	0,7085	±0,0214	-0,0088	0,8598	0,5189	0,9257
Abril	3,0667	±0,0597	-0,4369	±0,0438	0,0356	±0,0039	0,8023	±0,0270	0,1268	0,8691	0,5629	0,9269
Maio	2,9922	±0,0645	-0,3124	±0,0414	0,0140	±0,0043	0,7500	±0,0651	-0,1529	0,8661	0,4835	0,9113
Junho	2,7381	±0,0490	-0,2738	±0,0358	0,0122	±0,0029	0,9231	±0,0234	0,1668	0,8698	0,4469	0,9220
Julho	2,8448	±0,0488	-0,2346	±0,0357	0,0169	±0,0022	0,8521	±0,0213	0,0480	0,9041	0,3826	0,9481
Agosto	3,0776	±0,0430	-0,2260	±0,0316	0,0142	±0,0017	0,8694	±0,0167	0,0349	0,9177	0,3672	0,9562
Setembro	3,2317	±0,0424	-0,2090	±0,0313	0,0008	±0,0019	0,9919	±0,0171	-0,0365	0,9406	0,3456	0,9659
Outubro	3,2586	±0,0462	-0,1689	±0,0342	0,0069	±0,0024	0,9415	±0,0210	-0,0658	0,9402	0,3410	0,9650
Novembro	2,9864	±0,0480	-0,0794	±0,0357	0,0040	±0,0024	0,9658	±0,0198	-0,0878	0,9095	0,3888	0,9444
Dezembro	2,7516	±0,0519	-0,1063	±0,0387	0,0197	±0,0027	0,8446	±0,0219	-0,1031	0,8579	0,4580	0,9143
Anual	3,0208	±0,0424	-0,2572	±0,0313	0,0250	±0,0019	0,8098	±0,0171	0,0582	0,8447	0,4844	0,9269

Tabela 5. Coeficientes mensais e anual do modelo Multiplicativo (b) para estimativa da irradiância solar global horária e respectivos índices estatístico

Mês	e	desvio padrão	g	desvio padrão	MBE	r	RMSE	d
Janeiro	0,6832	±0,0306	0,5819	±0,0202	0,0766	0,8983	0,4537	0,9431
Fevereiro	0,6131	±0,0329	0,6059	±0,0225	0,1252	0,8811	0,5043	0,9324
Março	0,7332	±0,0361	0,5671	±0,0228	0,0865	0,9039	0,4646	0,9473
Abril	0,7503	±0,0427	0,5897	±0,0257	0,2607	0,8922	0,6000	0,9283
Mai	0,7114	±0,0358	0,4783	±0,0486	-0,2417	0,8927	0,4808	0,9157
Junho	0,7581	±0,0296	0,5124	±0,0204	0,0595	0,8800	0,4044	0,9358
Julho	0,6451	±0,0256	0,5314	±0,0194	-0,0034	0,8954	0,3978	0,9450
Agosto	0,6845	±0,0254	0,4608	±0,0206	0,0215	0,9279	0,3445	0,9624
Setembro	0,8564	±0,0352	0,3064	±0,0289	0,0148	0,9460	0,3258	0,9708
Outubro	0,6035	±0,0549	0,4974	±0,0462	-0,0165	0,9378	0,3389	0,9662
Novembro	0,7401	±0,0461	0,3992	±0,0378	-0,0036	0,9101	0,3746	0,9505
Dezembro	0,6096	±0,0271	0,5613	±0,0203	-0,0541	0,8786	0,4183	0,9322
Anual	0,6767	±0,0352	0,5260	±0,0289	0,0617	0,8983	0,4320	0,9460

De maneira geral, todos os modelos tiveram tendência a superestimativa no período chuvoso, e a subestimativa no período seco. Também pode-se observar uma estratificação dos horários para a relação entre R_g estimada e observada, particularmente entre os meses de setembro a novembro, que podem ser vistos nas Figuras de 2 a 11. Esses meses são caracterizados por serem os mais quentes na região e praticamente sem incidência de chuvas.

Os horários agruparam-se em pares como segue: (7h, 17h), (8h, 16h), (9h, 15h) e (10h,14h) (11h, 13h), provavelmente isso foi devido a características semelhantes da irradiância para esses horários, ou seja, temperatura e irradiância solar, conforme relatado por HOYT (1978) em várias localidades.

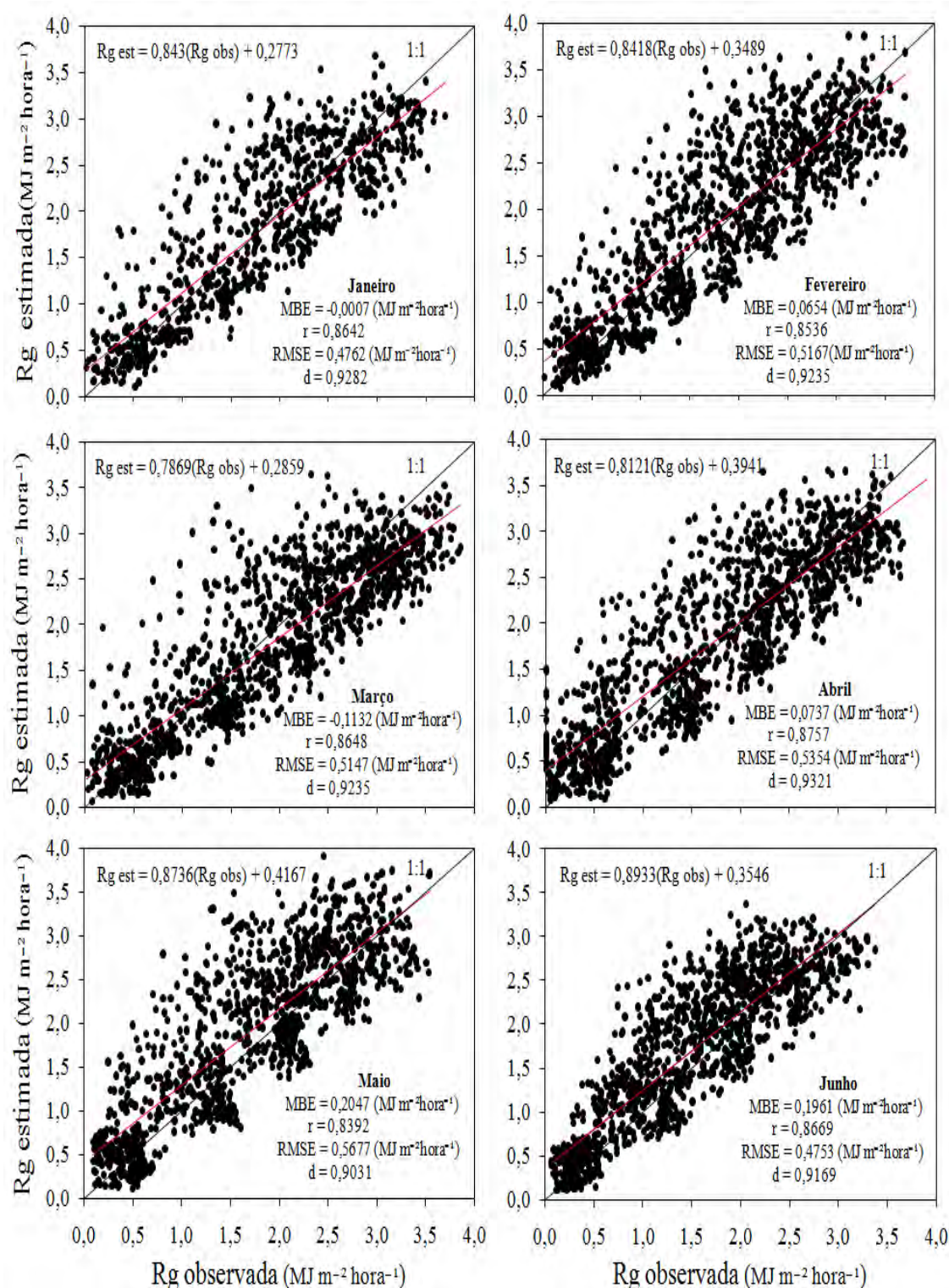


Figura 2. Relação entre a irradiância solar global (R_g) observada e estimada em $\text{MJ m}^{-2} \text{ hora}^{-1}$ e índices estatísticos MBE, “r”, RMSE e “d” dos meses de Janeiro, Fevereiro, Março, Abril, Maio e Junho para o modelo de Allen. A linha diagonal contínua representa a reta de 1:1.

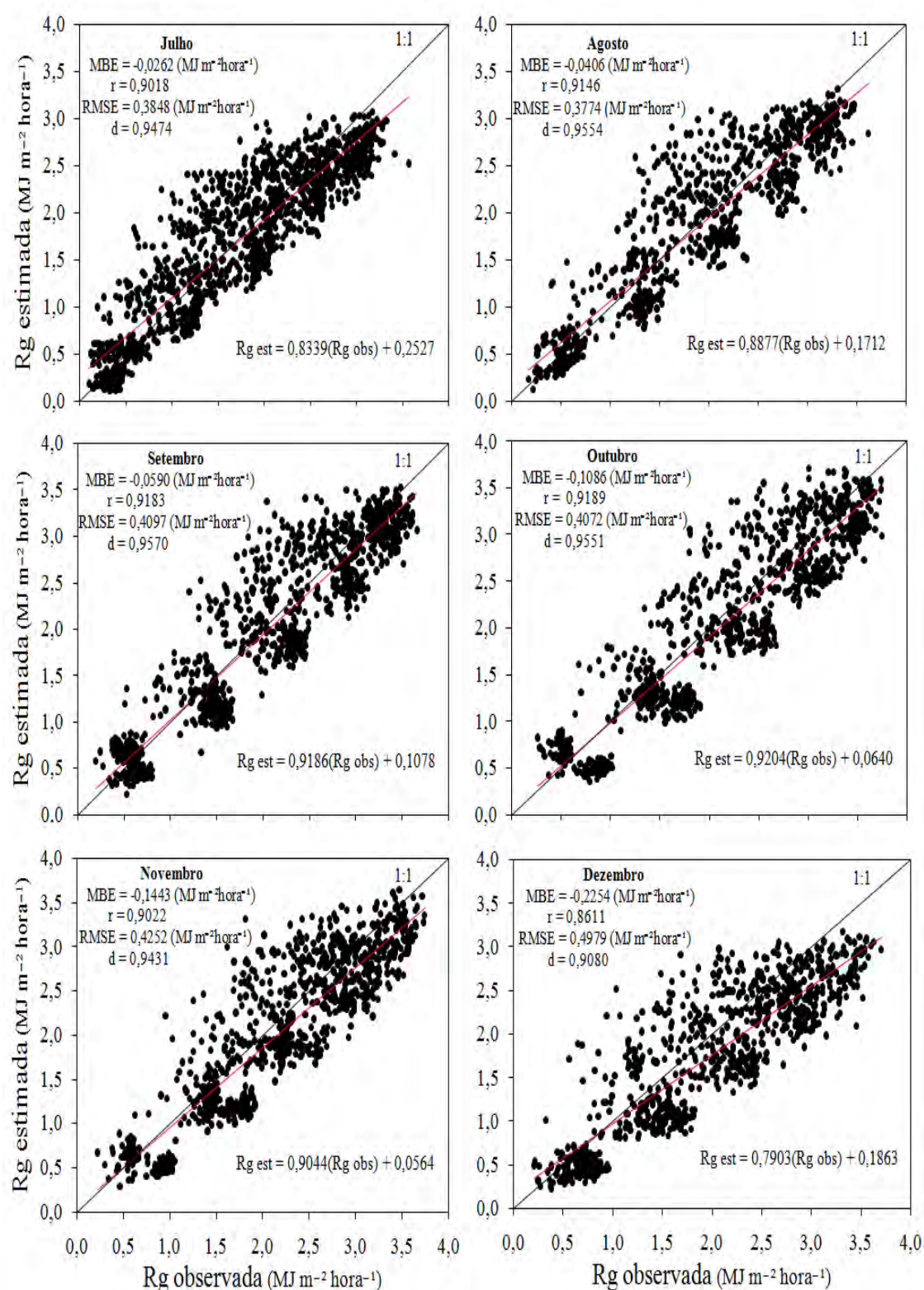


Figura 3. Relação entre a irradiância solar global (Rg) observada e estimada em MJ m⁻² hora⁻¹ e índices estatísticos MBE, “r”, RMSE e “d” dos meses de Julho, Agosto, Setembro, Outubro, Novembro e Dezembro para o modelo de Allen. A linha diagonal contínua representa a reta de 1:1.

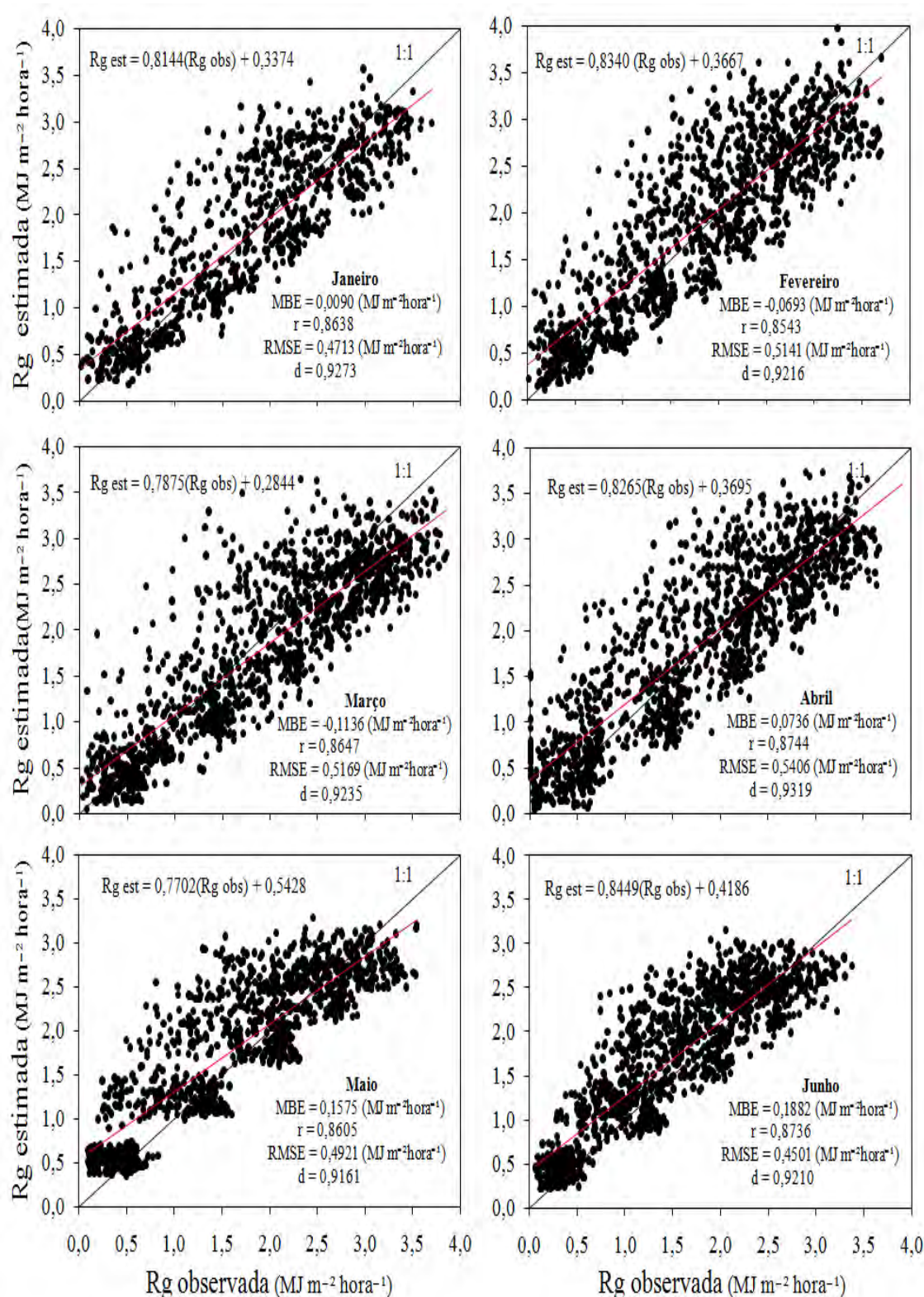


Figura 4. Relação entre a irradiância solar global (R_g) observada e estimada em $\text{MJ m}^{-2} \text{ hora}^{-1}$ e índices estatísticos MBE, “r”, RMSE e “d” dos meses de Janeiro, Fevereiro, Março, Abril, Maio e Junho para o modelo de Hargreaves. A linha diagonal contínua representa a reta de 1:1.

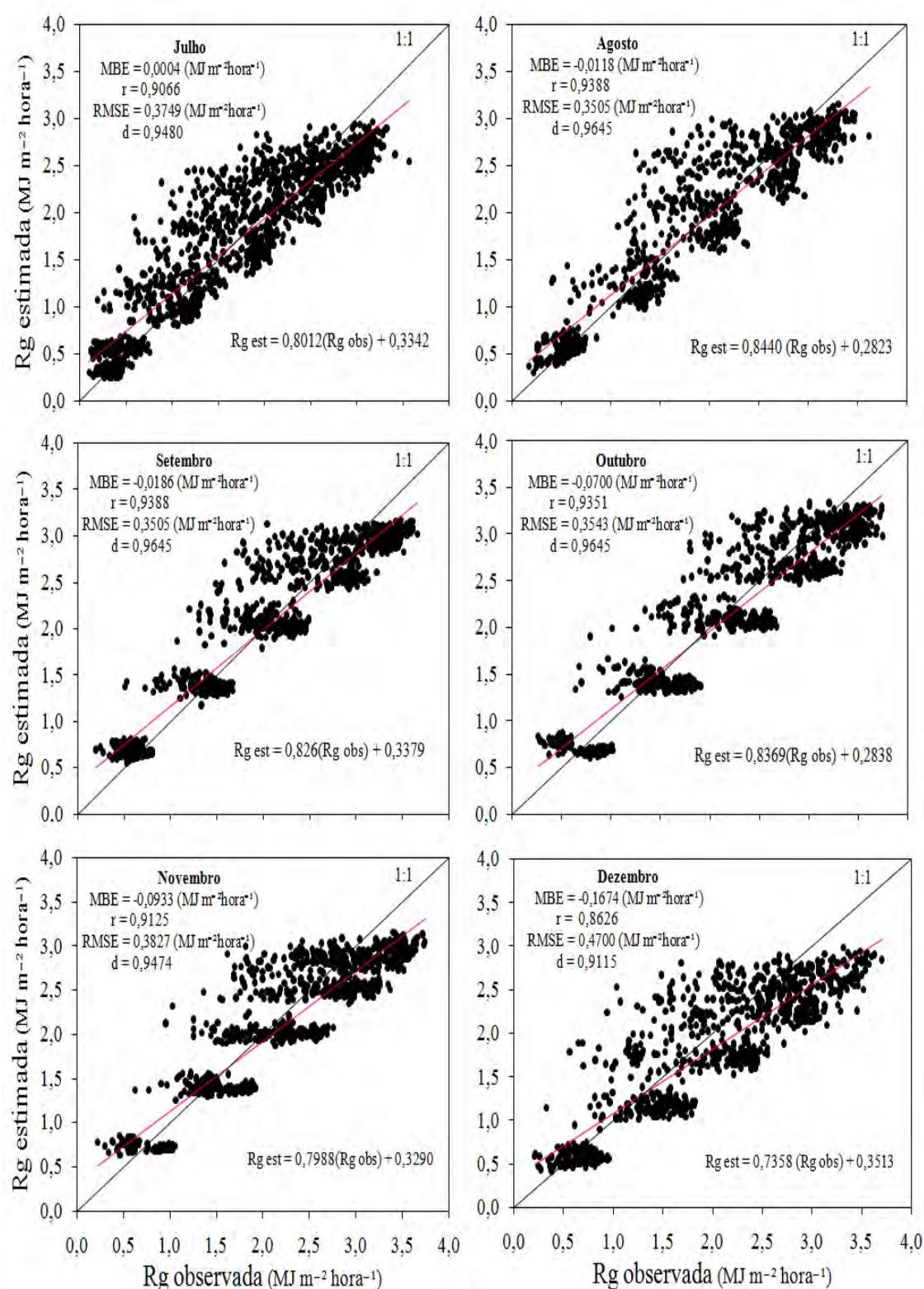


Figura 5. Relação entre a irradiância solar global (Rg) observada e estimada em MJ m⁻² hora⁻¹ e índices estatísticos MBE, “r”, RMSE e “d” dos meses de Julho, Agosto, Setembro, Outubro, Novembro e Dezembro para o modelo de Hargreaves. A linha diagonal contínua representa a reta de 1:1.

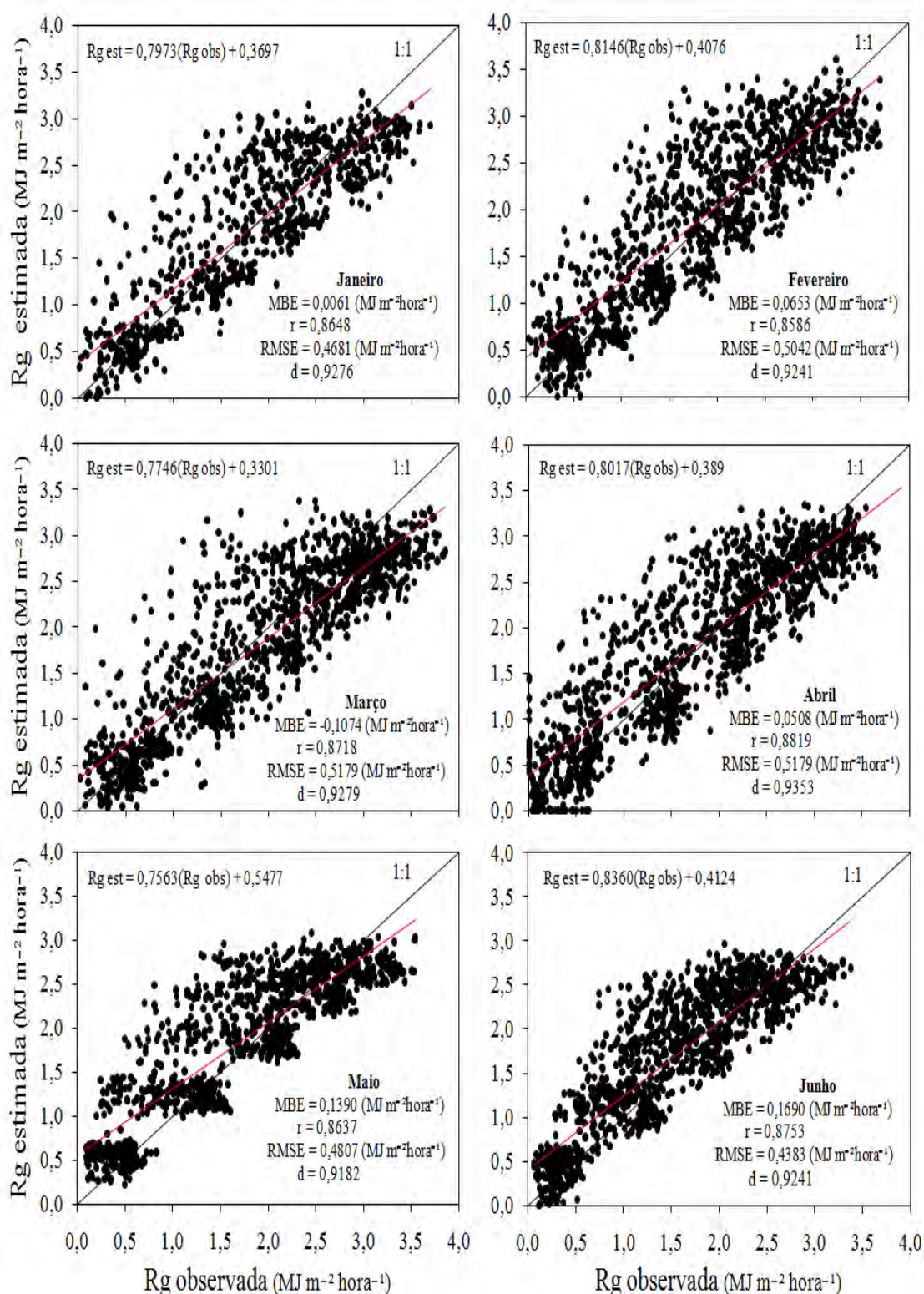


Figura 6. Relação entre a irradiância solar global (R_g) observada e estimada em $\text{MJ m}^{-2} \text{ hora}^{-1}$ e índices estatísticos MBE, “r”, RMSE e “d” dos meses de Janeiro, Fevereiro, Março, Abril, Maio e Junho para o modelo de Chen. A linha diagonal contínua representa a reta de 1:1.

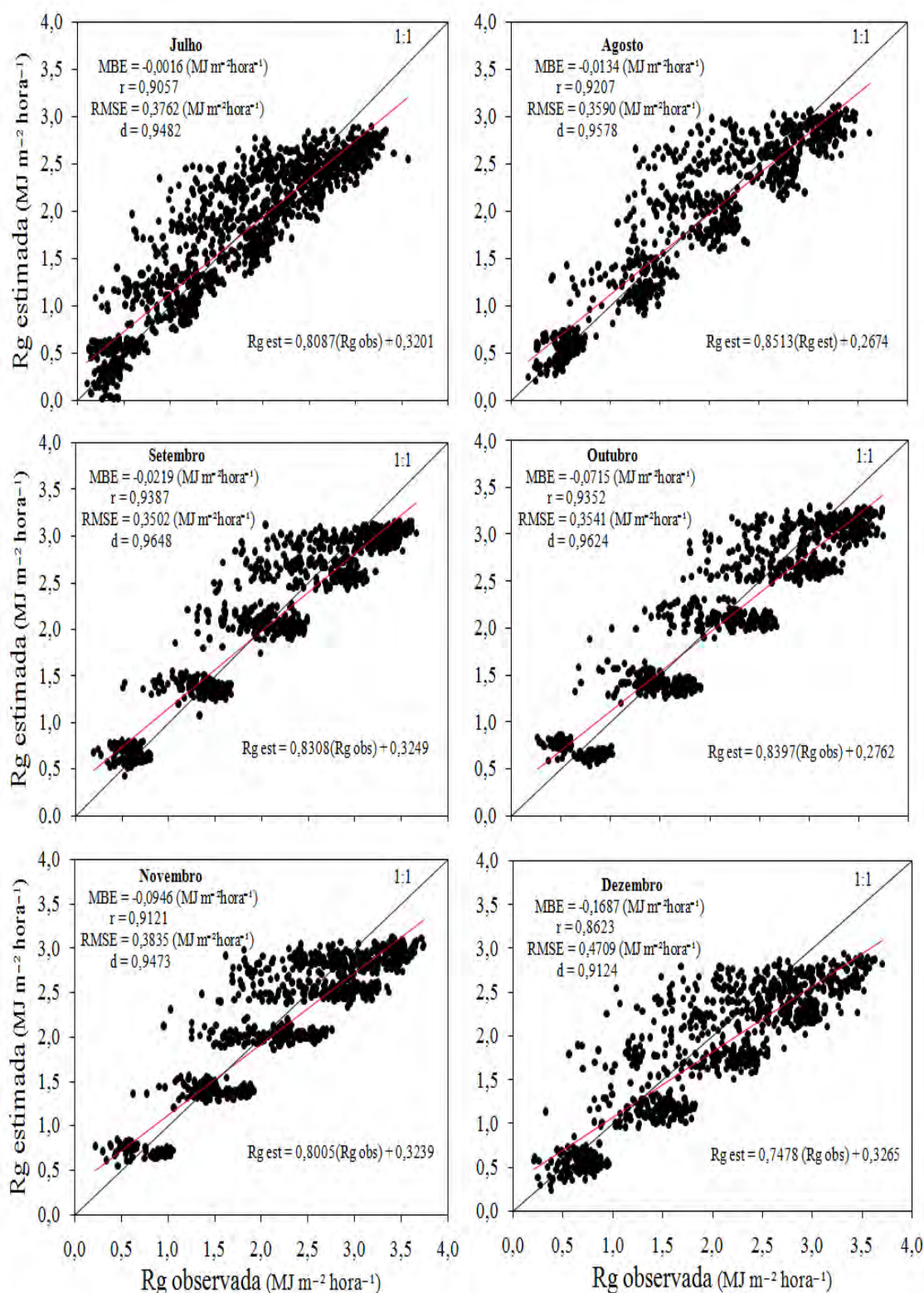


Figura 7. Relação entre a irradiância solar global (Rg) observada e estimada em MJ m⁻² hora⁻¹ e índices estatísticos MBE, “r”, RMSE e “d” dos meses de Julho, Agosto, Setembro, Outubro, Novembro e Dezembro para o modelo de Chen. A linha diagonal contínua representa a reta de 1:1.

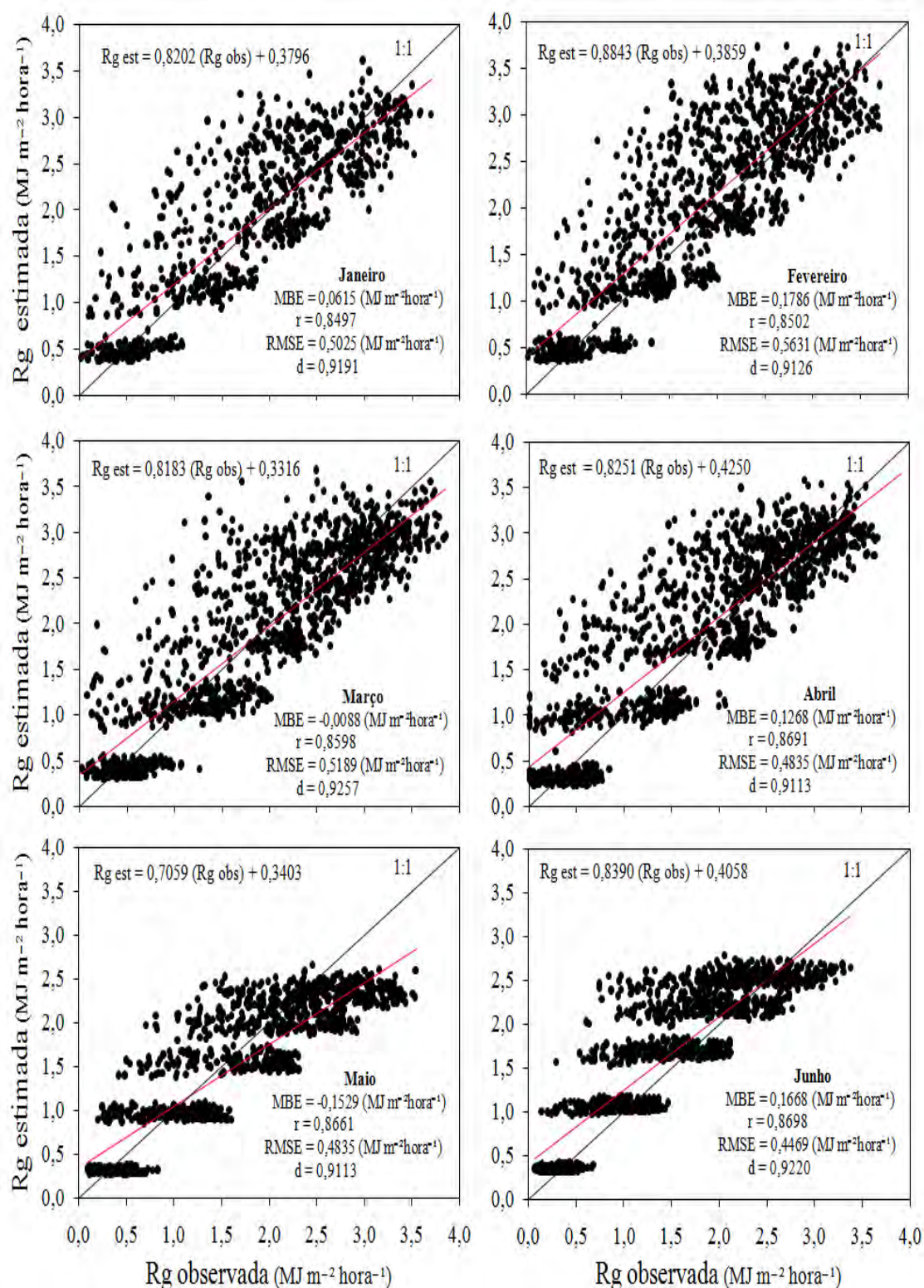


Figura 8. Relação entre a irradiância solar global (Rg) observada e estimada em MJ m⁻² hora⁻¹ e índices estatísticos MBE, “r”, RMSE e “d” dos meses de Janeiro, Fevereiro, Março, Abril, Maio e Junho para o modelo de Multiplicativo (a). A linha diagonal contínua representa a reta de 1:1.

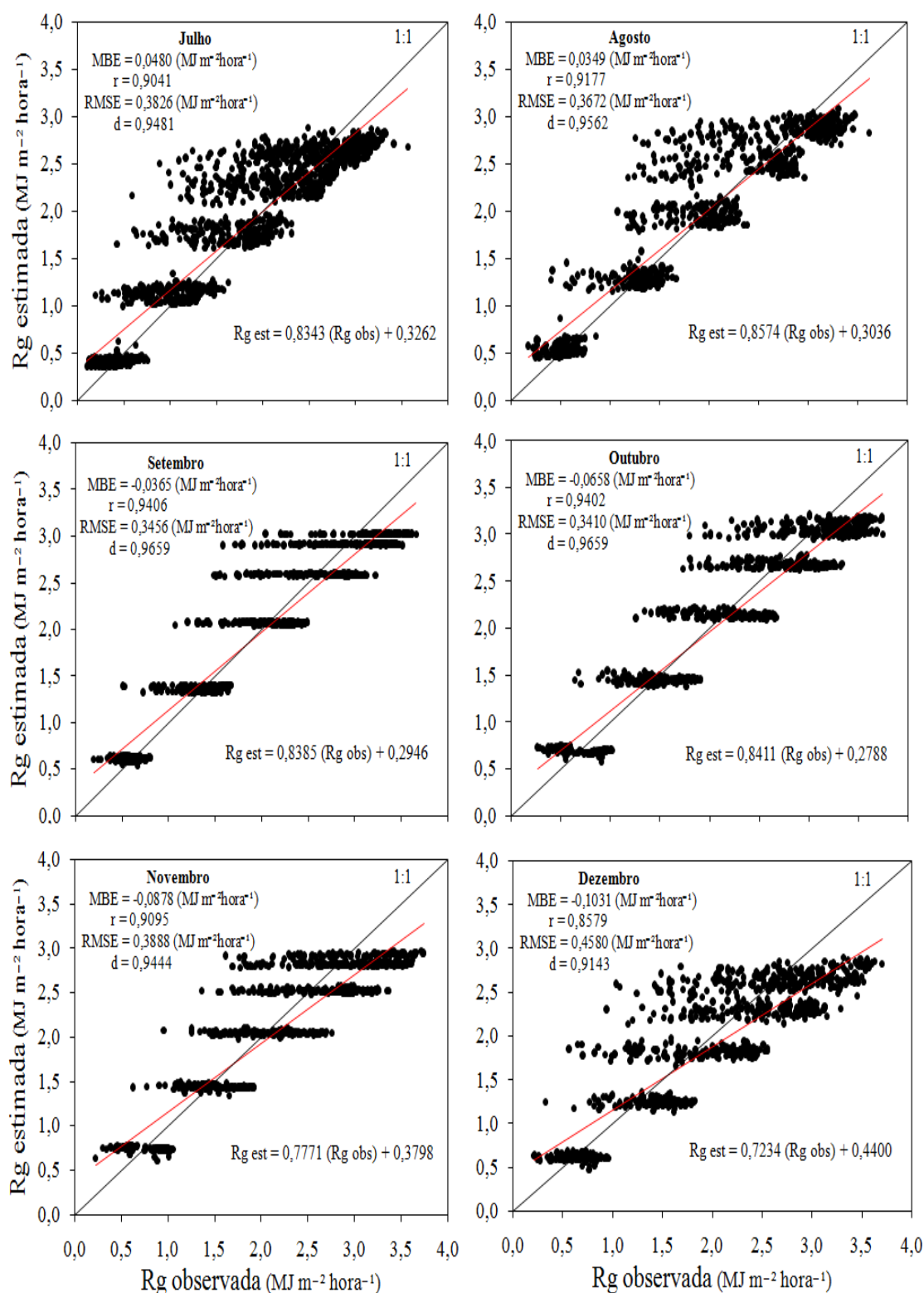


Figura 9. Relação entre a irradiância solar global (R_g) observada e estimada em $\text{MJ m}^{-2} \text{ hora}^{-1}$ e índices estatísticos MBE, “r”, RMSE e “d” dos meses de Janeiro, Fevereiro, Março, Abril, Maio e Junho para o modelo de Multiplicativo (a). A linha diagonal contínua representa a reta de 1:1.

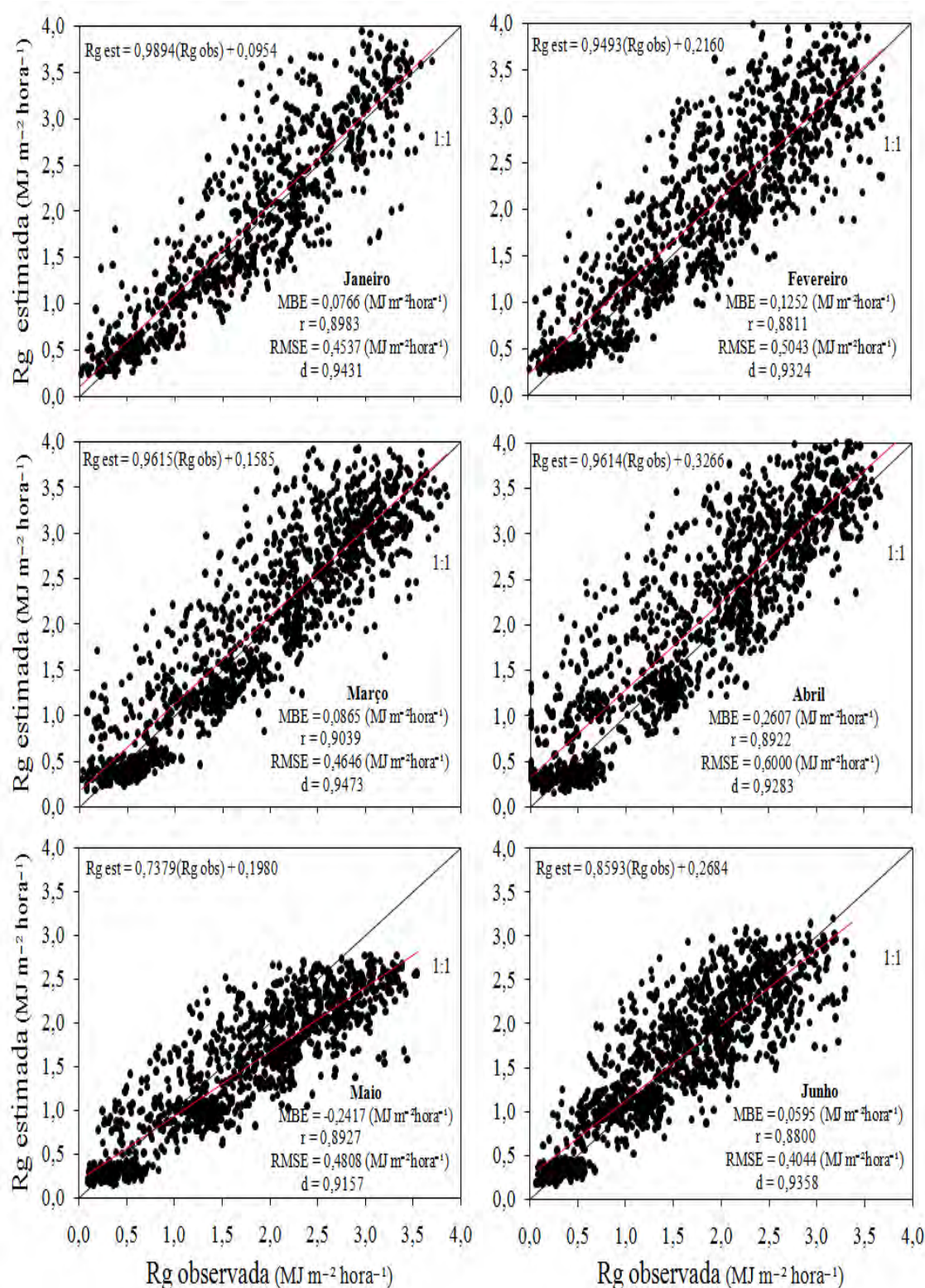


Figura 10. Relação entre a irradiância solar global (R_g) observada e estimada em $\text{MJ m}^{-2} \text{ hora}^{-1}$ e índices estatísticos MBE, “ r ”, RMSE e “ d ” dos meses de Janeiro, Fevereiro, Março, Abril, Maio e Junho para o modelo de Multiplicativo (b). A linha diagonal contínua representa a reta de 1:1.

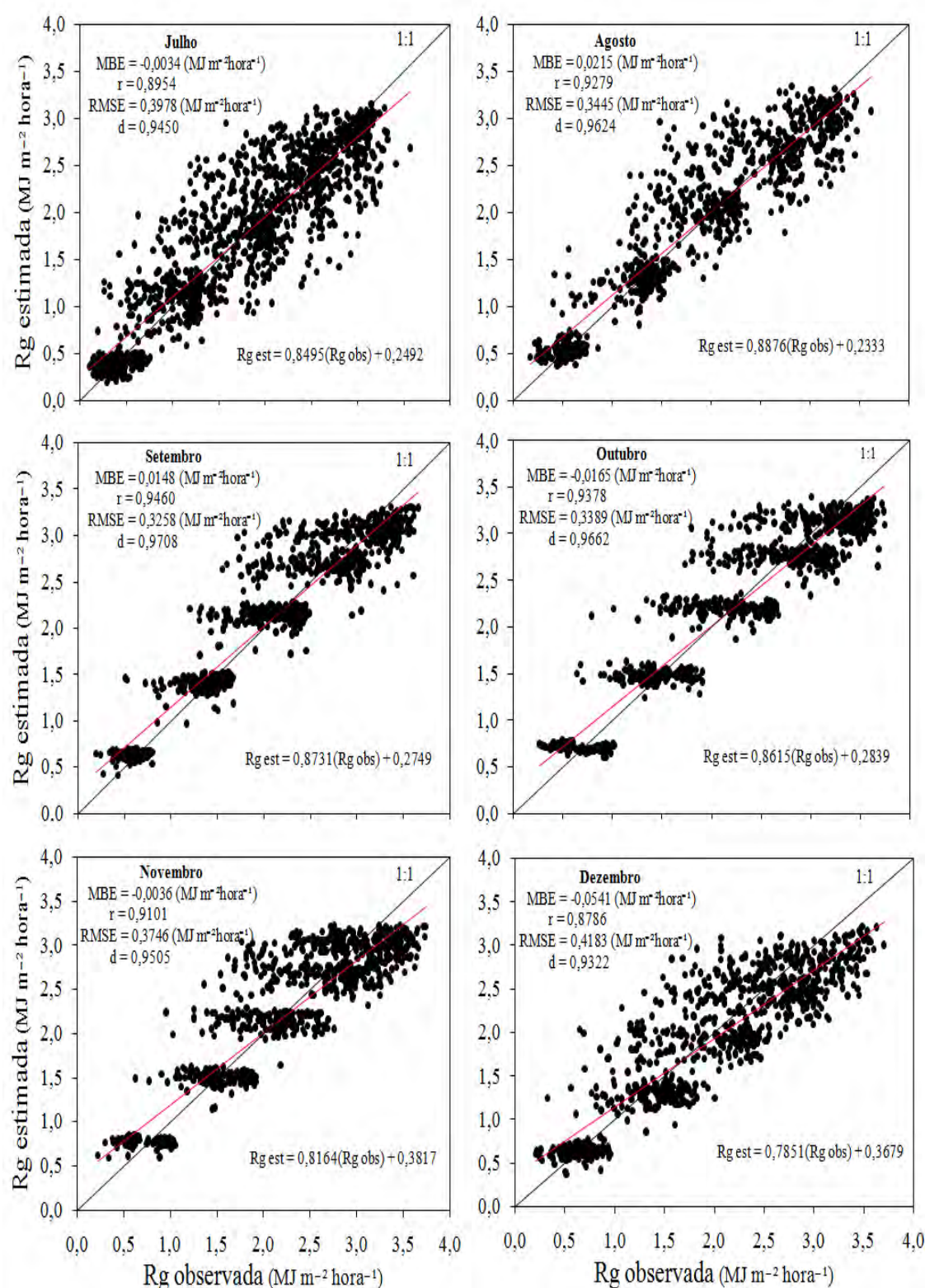


Figura 11. Relação entre a irradiância solar global (R_g) observada e estimada em $\text{MJ m}^{-2} \text{ hora}^{-1}$ e índices estatísticos MBE, “r”, RMSE e “d” dos meses de julho, agosto, setembro, outubro, novembro e dezembro para o modelo Multiplicativo (b). A linha diagonal contínua representa a reta de 1:1.

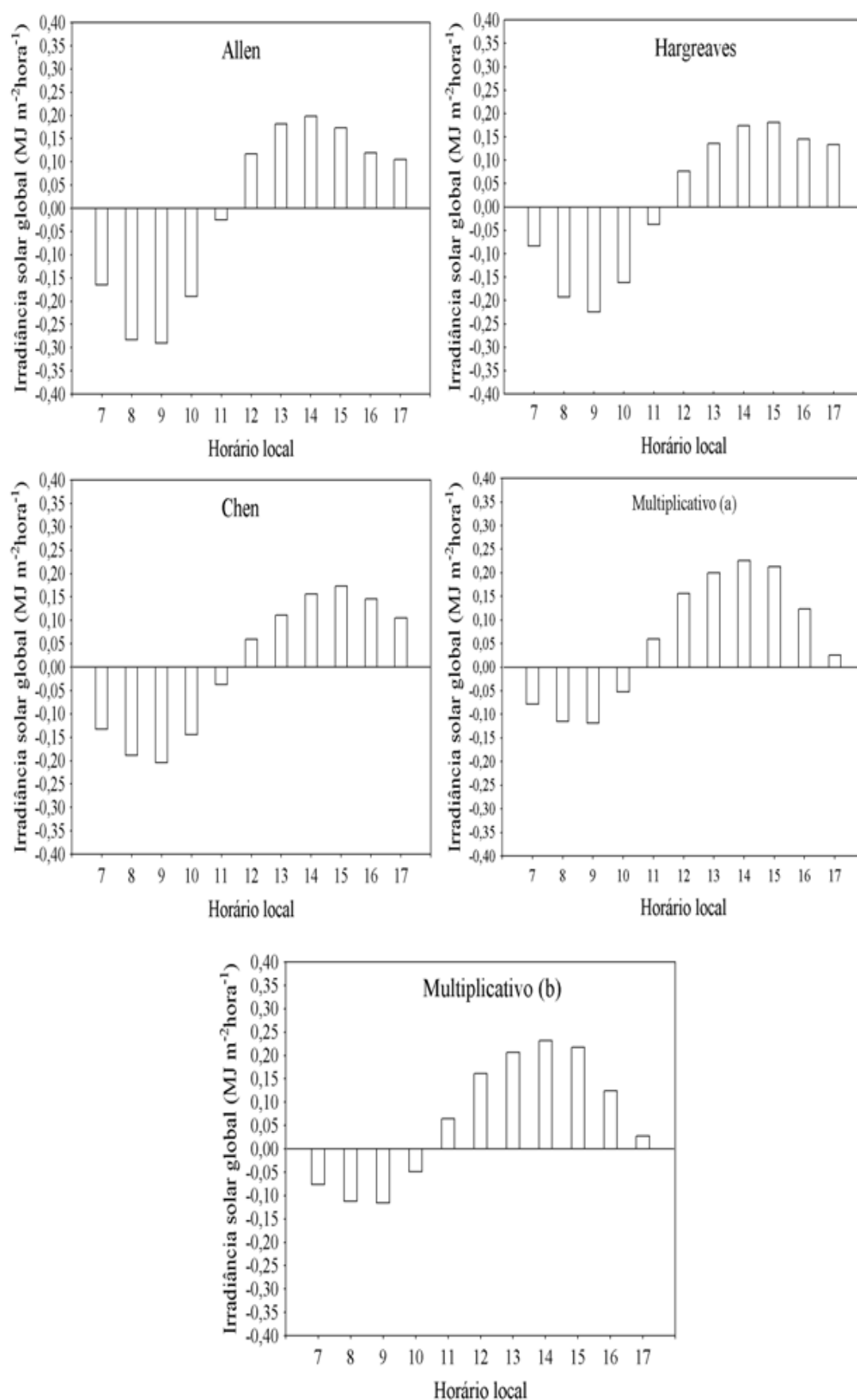


Figura 12. Desvio padrões da R_g estimada em relação a observada para cada hora (MBE). Barras verticais denotam médias.

Pode se visto na Figura 12 os desvio da R_g estimada a partir da observada para cada horário. Percebe-se que os modelos de Allen, Hargreaves e Chen subestimam pelo período da manhã das 7h até às 11h, e do meio dia até o fim da tarde, ocorre uma superestimativa. Já Para os modelos Multiplicativos (a e b) as subestimativas ocorrem de 7h até às 10h e superestimativas de 11h até às 17h. Observa-se ainda que as subestimativas dos modelos Multiplicativos (a e b) foram menores, indicando que este modelos produz menos erros pelo período da manhã.

Por outro lado, no período da tarde as superestimativas são bastante similares no que diz respeito as magnitude dos erros, exceto para 17h, em que os modelos Multiplicativos são menores. Desta forma, considerando as relações da temperatura e duração diária de brilho solar com a irradiância solar, pode-se dizer que o modelos Multiplicativos tiveram os melhores resultados frente aos outros modelos estudados, sugerindo que este pode ser usado para estimativa horárias da R_g .

Segundo KIMURA e STEPHENSON (1969) e GUL e MUNEER (1998) em estudos de irradiância solar horária é importante ter o conhecimento da cobertura de nuvens, e nesse contexto, o modelo multiplicativo (b) demonstrou ser o modelo mais adequado, inferindo assim que a duração diária de brilho solar, que é um indicador da cobertura de nuvens, e apesar de ser uma variável de magnitude diária, colaborou de maneira significativa na estimativa da R_g horária, como relata REVFEIM (1997) em estudo da estimativa da R_g horária a partir de dados diários, e já mostrado por WHILLIER (1956) que demonstrou que distribuição das curvas da irradiância horária e diária são muito semelhantes entre si.

Por outro lado, SPOKAS e FORCELLA (2005) concluíram que modelos empíricos estimaram de maneira adequada a R_g horária com apenas dados de temperatura máxima e mínima, concordando com os resultados aqui encontrados de maneira geral para os modelos de Allen, Hargreaves, Chen e Multiplicativo (a).

4.2. Análise diária da irradiância solar global

As Tabelas 6, 7 e 8 contêm os coeficientes obtidos para todos os modelos do mês mais chuvoso (abril) do mês mais quente (outubro) e para o período anual, com respectivos erro padrão e índices estatísticos, MBE ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), coeficiente de correlação (r), RMSE ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) e índice de concordância (d). No apêndice

encontra-se os resultados para todos os meses e modelos, com respectivos coeficientes e análise estatística.

A partir dos índices estatísticos, pode-se observar o comportamento dos extremos do clima da região e verificar as variações dos coeficientes e estimativas da R_g . De modo geral, o coeficiente de correlação variou entre 0,53 a 0,79 para o mês de abril, enquanto para o mês de outubro variou entre 0,21 a 0,41.

De forma geral, os modelos que utilizam a nebulosidade como variável obtiveram melhores resultados do que aqueles que apenas utilizam temperatura como variável para o mês de Abril, como encontrou FALAYI et al. (2008) em estudo realizado em Iseyin, Nigéria. Por outro lado, o contrário observa-se para o mês de Outubro em que os modelos baseados em temperaturas apresentaram bons resultados, destacando-se o modelo de Allen com “d” igual a 0,60 que apenas utiliza os extremos de temperatura, sugerindo que os as diferenças encontradas estão relacionadas as características climáticas da região.

Os gráficos foram agrupados em figuras com modelos de características e variáveis semelhantes, para melhor se observar as diferentes particularidades dos modelos diante das variáveis utilizadas, como pode ser visto nas Figuras 13, 14, 15 e 16 para o mês de abril e nas Figuras 17, 18, 19 e 20 para o mês de outubro,

Na Figura 13 estão os modelos de Allen, Hargreaves e Chen (a). Esses modelos utilizam a diferença dos extremos de temperatura, na qual os modelos de Hargreaves e Chen (a) alcançaram melhores resultados, com “d” iguais a 0,71 e 0,70, e com os menores MBE respectivamente. Esses resultados indicam que estes modelos podem ser usados quando se tem acesso a apenas dados de temperatura máxima e mínima para estimativa da R_g . BANDYOPADHYAY et al. (2008) também indicaram os modelos de Hargreaves e Allen para várias cidades Indianas e mostraram a viabilidade destes modelos para uso na estimativa da evapotranspiração.

Na Figura 14, observa-se que o modelo de Bahel teve melhor desempenho que o de Angström, em todos os índices estatísticos, porém percebe-se que não há grande diferença entre seus resultados como verificou CHEN et al., (2004), sugerindo que este foi mais adequado que o proposto por Bahel pela menor quantidade de fatores e pela facilidade dos cálculos envolvidos na estimativa da R_g .

Os modelos de Ododo (b) e Chen (b) estão apresentados na Figura 15, onde pode ser visto que eles tiveram os melhores resultados para o mês de abril, e entre eles não houve grande diferença. Entretanto, pelo fato do modelo de Ododo (b)

utilizar uma variável a mais, a umidade relativa, e esta não melhorar a estimativa da R_g de maneira significativa, o modelo de Chen (b) se mostrou mais eficiente com duas variáveis. Estas são, diferença dos extremos de temperatura do ar e razão de duração diária de brilho solar, sugerindo que este modelo é mais adequado para o mês de abril.

A Figura 16 mostrou que os modelos de Swartman e Ongulade e Ododo (a) são bastante similares, com “d” iguais a 0,87 e 0,86, respectivamente. Todavia, o modelo multiplicativo obtido por duas funções lineares, a primeira em função da razão de duração diária de brilho solar e a segunda, também linear, em função da temperatura máxima do ar, não alcançou resultados satisfatório, pois apesar de bom desempenho quanto ao “d” igual a 0,8374, seu o RMSE ($3,03 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) e MBE ($1,52 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) foram bastante superiores aos dos outros modelos.

Apesar dos modelos, que utilizam apenas a temperatura como dados de entrada (Allen, Hargreaves e Chen), terem proporcionado resultados inferiores daqueles que possuem a duração diária de brilho solar como variável, esses foram satisfatórios, concordando com SUPIT e KAPPEL (1998) em estudo realizados em várias cidades européias, e discordando de CHEN et al., (2004) que não recomendou a utilização de modelos baseados apenas em temperatura para a China.

Pode ser visto na Figura 17 os modelos de Allen, Hargreaves e Chen (a), observa-se alta incidência da irradiância solar em outubro, com a R_g variando na sua maioria entre 20 a $27 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, devido a isso, encontra-se as maiores temperaturas neste mês. O modelo de Allen teve o melhor desempenho entre os três, pois apesar do alto RMSE ($1,67 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) seu MBE foi o menor. Ressalta-se que este modelo também obtivera resultados semelhantes aos modelo Ododo (b) e multiplicativo (Tabela 7).

Os modelo de Angström assim de Bahel obtiveram os desempenhos menos satisfatório dentre todos os avaliados, evidenciando assim que apenas a variável razão de duração diária de brilho solar não foi suficiente para explicar a R_g no mês de outubro, como pode ser visto na Figura 18.

Na Figura 19 pode ser visto que os desempenhos dos modelos de Ododo (b) e Chen (b) tiveram resultados semelhantes, exceto pelo MBE, em que o modelo de Ododo (b) foi 94,64% inferior.

Na Figura 20 observa-se, dentre os modelos, que o multiplicativo destaca-se dentre os demais, com o melhor desempenho e os menores erros. O modelo de

Ododo (a) também se mostrou adequado, com resultados similares. Por outro o modelo de Swartman e Ongulade não obteve bom desempenho.

Nas Figuras 21, 22, 23 e 24 encontram-se os gráficos da análise anual para todos os modelos utilizados. Comparando-se os resultados, pode-se observar que os modelos de Ododo (b), Chen (b) e Multiplicativo forneceram os melhores resultados para estimativa e os menores erros, demonstrando essa eficácia pelo “d”, como pode ser visto na Tabela 8, e nas Figuras 23 e 24.

Ressalta-se que os coeficientes para os modelos avaliados variam temporalmente e, assim, seus resultados dependem das propriedades físicas das nuvens, refletividade do solo e propriedades da massa de ar tais como: vapor d’água e concentração de aerossóis (MARTINEZ-LOZANO et al., 1984; BOISVERT et al., 1990; NONHEBEL, 1994; HANSEN, 1999) ainda o mês de outubro por ser caracterizado pela presença de poucas nuvens e o mês de setembro e novembro com ausência de chuvas, tendo como consequência valores das integrais diárias da irradiância solar global serem muito idênticos, o que provocou resultados com razoável precisão e exatidão para todos os modelos.

Segundo LEFEVRE et al. (2007), as incertezas resultantes expressas tanto pelo RMSE como pelo MBE, podem ser parcialmente superadas pelos recentes e promissores métodos que utilizam dados de satélite para avaliar os dados de obtidos na superfície terrestre de irradiância solar. Por outro lado, esses dados ainda não estão amplamente disponíveis, e modelos são ainda necessários para a estimativa da irradiância solar (FORTIN et al., 2008).

Tabela 6. Coeficientes dos modelos para o mês de abril com respectivos erro padrão e índices estatísticos

Modelo	a	desvio padrão	b	desvio padrão	c	desvio padrão	d	desvio padrão	e	desvio padrão	MBE	r	RMSE	"d"
Allen	0,1749	±0,0026	–	–	–	–	–	–	–	–	-0,0963	0,5313	3,0944	0,6345
Hargreaves	0,2647	±0,0228	-0,2741	±0,0693	–	–	–	–	–	–	-0,0427	0,5313	3,1447	0,7121
Angström	0,2981	±0,0118	0,4130	±0,0196	–	–	–	–	–	–	0,8134	0,7583	2,5415	0,8542
Bahel	0,2668	±0,0197	0,8649	±0,1696	-1,2085	±0,4228	0,8555	±0,2981	–	–	0,7669	0,7700	2,4696	0,8603
Swartman and Ongulade	5,4180	±5,0113	0,3122	±0,0401	-0,4830	±0,2135	–	–	–	–	0,8858	0,7772	2,5199	0,8668
Ododo (a)	0,3745	±1,1126	0,2976	±0,0436	0,5753	±0,6226	-0,3331	±0,2598	–	–	0,9596	0,7730	2,5686	0,8628
Ododo (b)	-0,3824	±0,1877	1,4947	±0,3646	0,0301	±0,0051	-0,0027	±0,0010	-0,0368	±0,0113	1,0939	0,7883	2,5171	0,8636
Chen (a)	0,3545	±0,0303	-0,2536	±0,0669	–	–	–	–	–	–	-0,0277	0,5470	3,0649	0,7060
Chen (b)	0,1490	±0,0266	0,3129	±0,0237	1,3644	±0,2230	0,0515	±0,0469	–	–	0,7250	0,7562	2,5397	0,8571
Multiplicativo ¹	0,4137	±0,0195	0,2978	±0,0118	0,0366	±0,0074	-0,1827	±0,2398	–	–	1,5157	0,7597	3,0297	0,8374

¹O modelo elaborado teve duas funções lineares: $f(n/N) = a + b(n/N)$ e $f(t_{max}) = c + d(T_{max})$, formando o modelo $R_g/R_o = f(n/N) f(T_{max})$.

Tabela 7. Coeficientes dos modelos para o mês de outubro com respectivos erro padrão e índices estatísticos.

Modelo	a	desvio padrão	b	desvio padrão	c	desvio padrão	d	desvio padrão	e	desvio padrão	MBE	r	RMSE	"d"
Allen	0,1772	±0,0028	–	–	–	–	–	–	–	–	-0,1911	0,3305	1,6713	0,5964
Hargreaves	0,1375	±0,0216	0,1630	±0,0735	–	–	–	–	–	–	-0,3394	0,3290	1,5833	0,5557
Angström	0,3035	±0,0339	0,3898	±0,0402	–	–	–	–	–	–	-0,1681	0,2105	1,5622	0,3656
Bahel	0,2659	±0,1455	1,0137	±0,9295	-1,5868	±1,7005	1,0559	±0,9448	–	–	0,0113	0,2205	1,6122	0,4788
Swartman e Ongulade	1,7941	±0,8461	0,3939	±0,0529	-0,2387	±0,1156	–	–	–	–	-0,2955	0,2275	1,5794	0,4287
Ododo (a)	0,0033	±0,0043	0,3490	±0,0476	1,3456	±0,2669	0,1327	±0,1305	–	–	0,3652	0,3651	1,5785	0,5959
Ododo (b)	-1,4379	±0,7481	1,4456	±0,8791	0,0497	±0,0216	0,0012	±0,0013	-0,0326	±0,0258	0,0084	0,3801	1,4923	0,5955
Chen (a)	0,2296	±0,0354	0,0697	±0,0863	–	–	–	–	–	–	-0,3378	0,3347	1,5715	0,5535
Chen (b)	0,1399	±0,0301	0,2533	±0,0361	2,1345	±0,7560	0,1122	±0,0767	–	–	0,1569	0,4018	1,4628	0,5606
Multiplicativo ¹	0,3899	±0,0402	0,3034	±0,0338	0,0315	±0,0060	-0,1031	±0,2094	–	–	0,1932	0,4099	1,4796	0,6121

¹O modelo elaborado teve duas funções lineares: $f(n/N) = a + b(n/N)$ e $f(t_{max}) = c + d(T_{max})$, formando o modelo $R_g/R_o = f(n/N) f(T_{max})$.

Tabela 8. Coeficientes dos modelos para o período anual com respectivos erro padrão e índices estatísticos.

Modelo	a	desvio padrão	b	desvio padrão	c	desvio padrão	d	desvio padrão	e	desvio padrão	MBE	r	RMSE	"d"
Allen	0,1772	±0,0061	–	–	–	–	–	–	–	–	0,2366	0,6705	2,9717	0,7576
Hargreaves	0,2771	±0,0061	-0,3093	±0,0201	–	–	–	–	–	–	0,7627	0,6489	3,2529	0,7913
Angström	0,2693	±0,0044	0,3997	±0,0060	–	–	–	–	–	–	-0,6493	0,7529	2,7314	0,8540
Bahel	0,2458	±0,0090	0,6705	±0,0689	-0,6519	±0,1511	0,4307	±0,0964	–	–	-0,6245	0,7527	2,7336	0,8553
Swartman and Ongulade	2,6578	±0,1221	0,3054	±0,0081	-0,3439	±0,0225	–	–	–	–	-0,6563	0,7323	2,9160	0,8449
Ododo (a)	0,0748	±0,0235	0,2935	±0,0083	0,7268	±0,0926	-0,1066	±0,0299	–	–	-0,7442	0,7503	2,8331	0,8532
Ododo (b)	-0,2839	±0,0761	0,7411	±0,0949	0,0185	±0,0022	-0,0004	±0,0002	-0,0119	±0,0029	-0,6596	0,7781	2,6453	0,8716
Chen (a)	0,3949	±0,0094	-0,3708	±0,0223	–	–	–	–	–	–	-0,4902	0,6578	3,0915	0,7962
Chen (b)	0,1412	±0,0080	0,3501	±0,0083	0,8813	±0,0638	-0,0262	±0,0173	–	–	-0,3284	0,7874	2,5236	0,8819
Multiplicativo ¹	0,3835	±0,0044	0,3093	±0,0060	0,0120	±0,0558	0,5935	±0,0016	–	–	0,3972	0,7693	2,6277	0,8711

¹O modelo elaborado teve duas funções lineares: $f(n/N) = a + b(n/N)$ e $f(t_{max}) = c + d(T_{max})$, formando o modelo $R_g/R_o = f(n/N) f(T_{max})$.

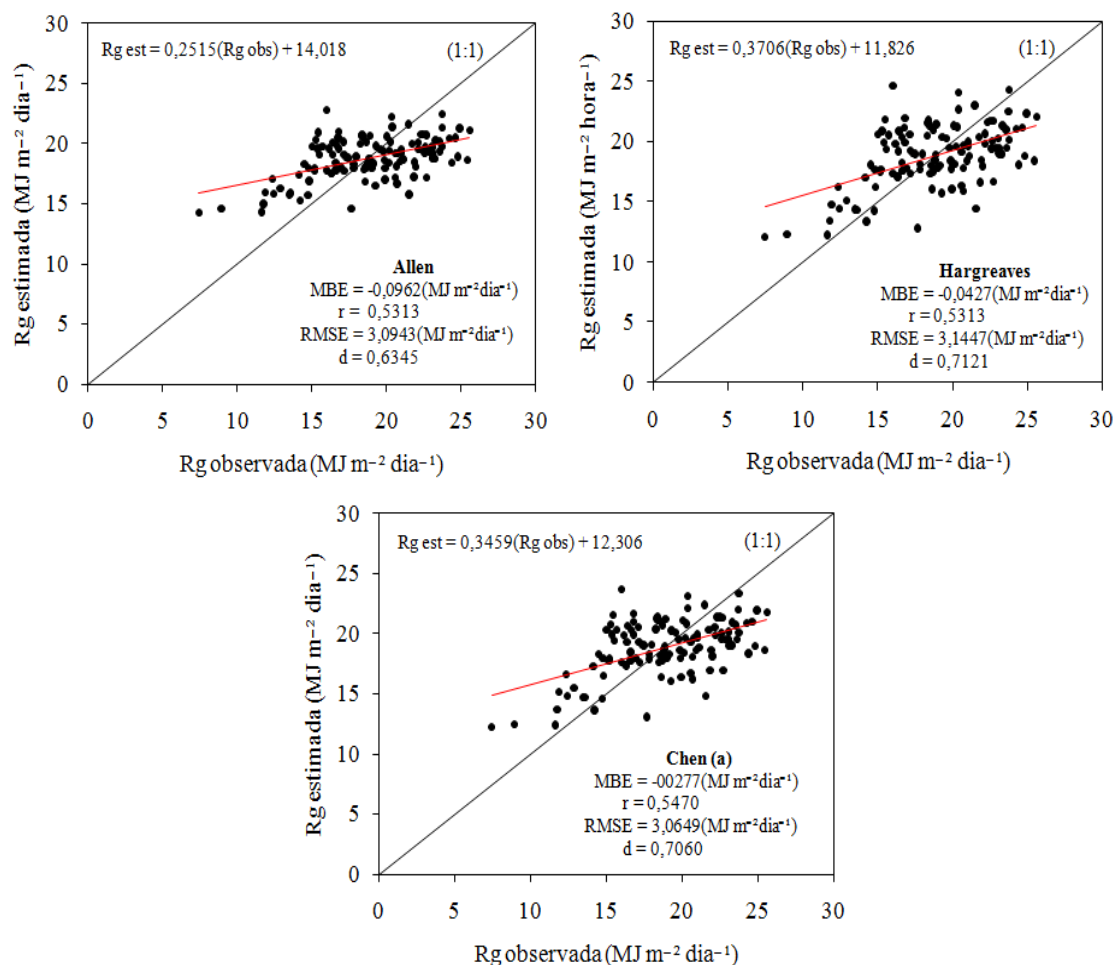


Figura 13. Relação entre a irradiância solar global (R_g) observada e estimada em $MJ \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ e índices estatísticos MBE, “r”, RMSE e “d” dos modelos de Allen, Hargreaves e Chen para o mês de abril. A linha diagonal contínua representa a reta de 1:1.

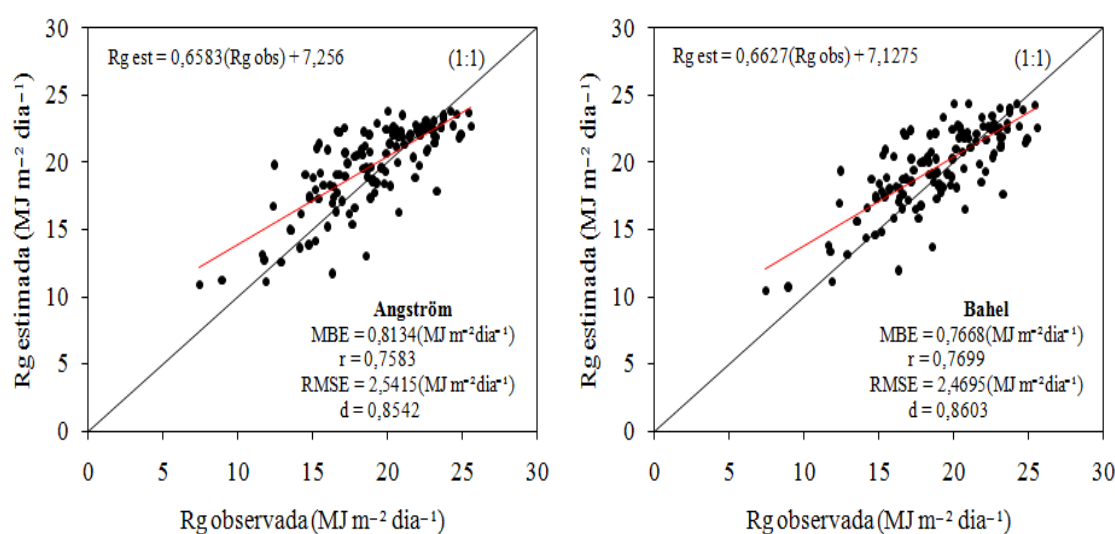


Figura 14. Relação entre a irradiância solar global (R_g) observada e estimada em $MJ \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ e índices estatísticos MBE, “r”, RMSE e “d” dos modelos de Angström e Bahel para o mês de abril. A linha diagonal contínua representa a reta de 1:1.

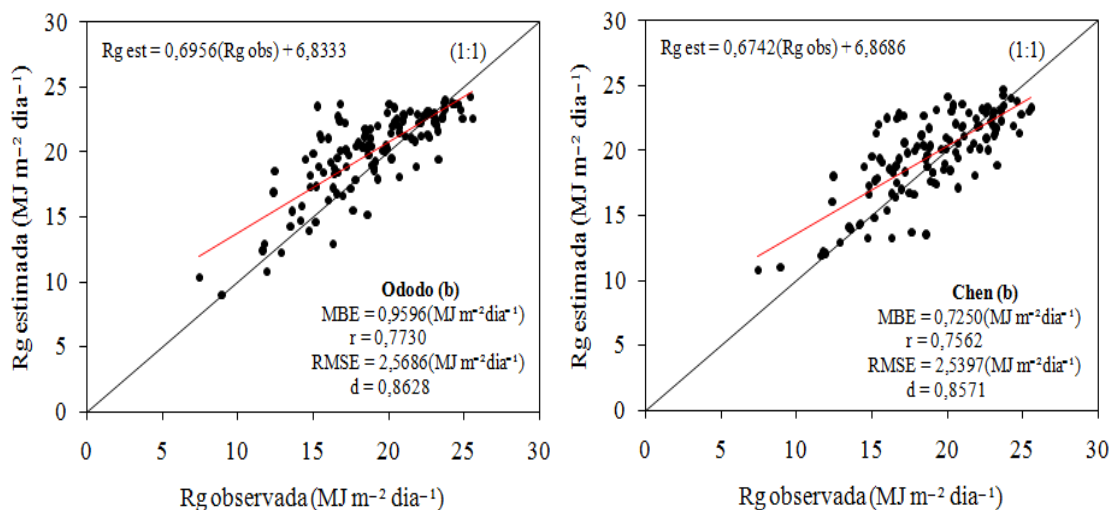


Figura 15. Relação entre a irradiância solar global (Rg) observada e estimada, em $MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$, e índices estatísticos MBE, “r”, RMSE e “d” dos modelos de Ododo (b) e Chen (b) para o mês de abril. A linha diagonal contínua representa a reta de 1:1.

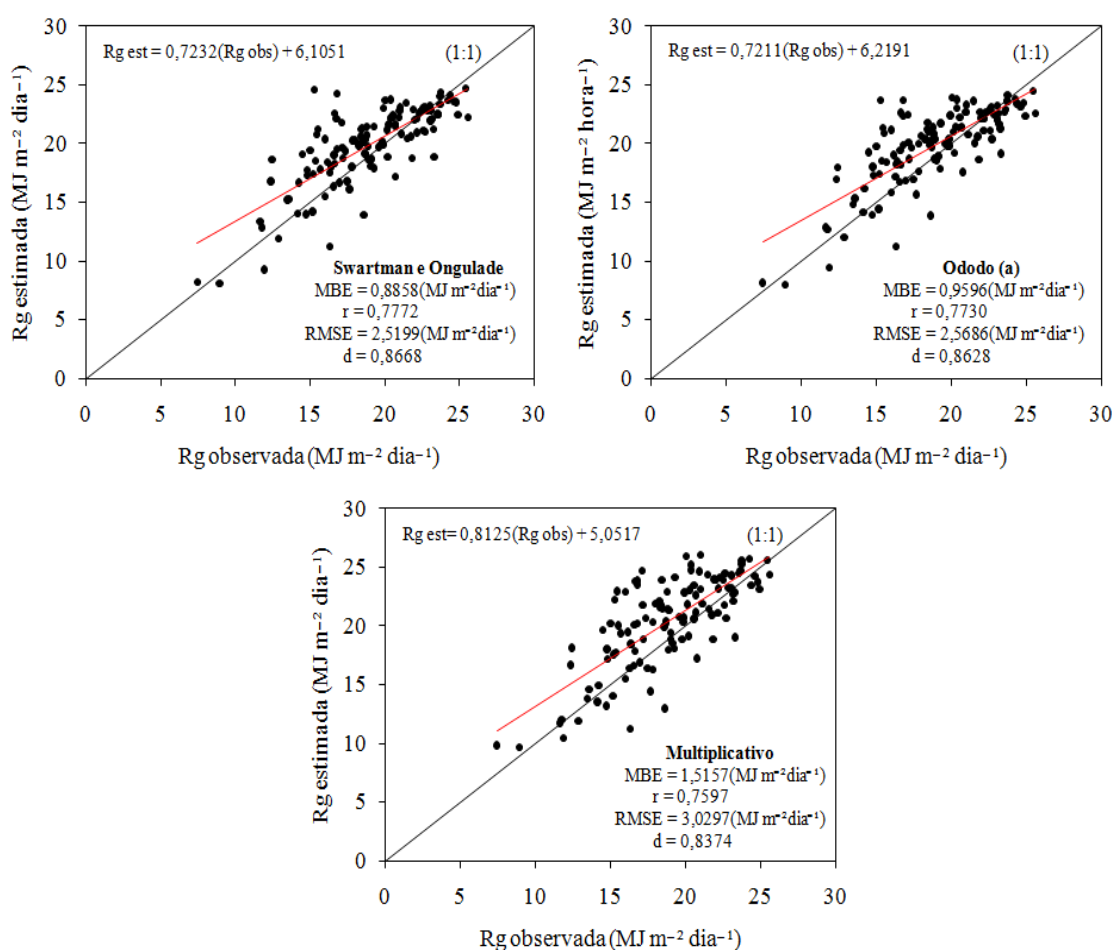


Figura 16. Relação entre a irradiância solar global (Rg) observada e estimada em $MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$ e índices estatísticos MBE, “r”, RMSE e “d” dos modelos de Swartman e Ongulade, Ododo (a) e Multiplicativo para o mês de abril. A linha diagonal contínua representa a reta de 1:1.

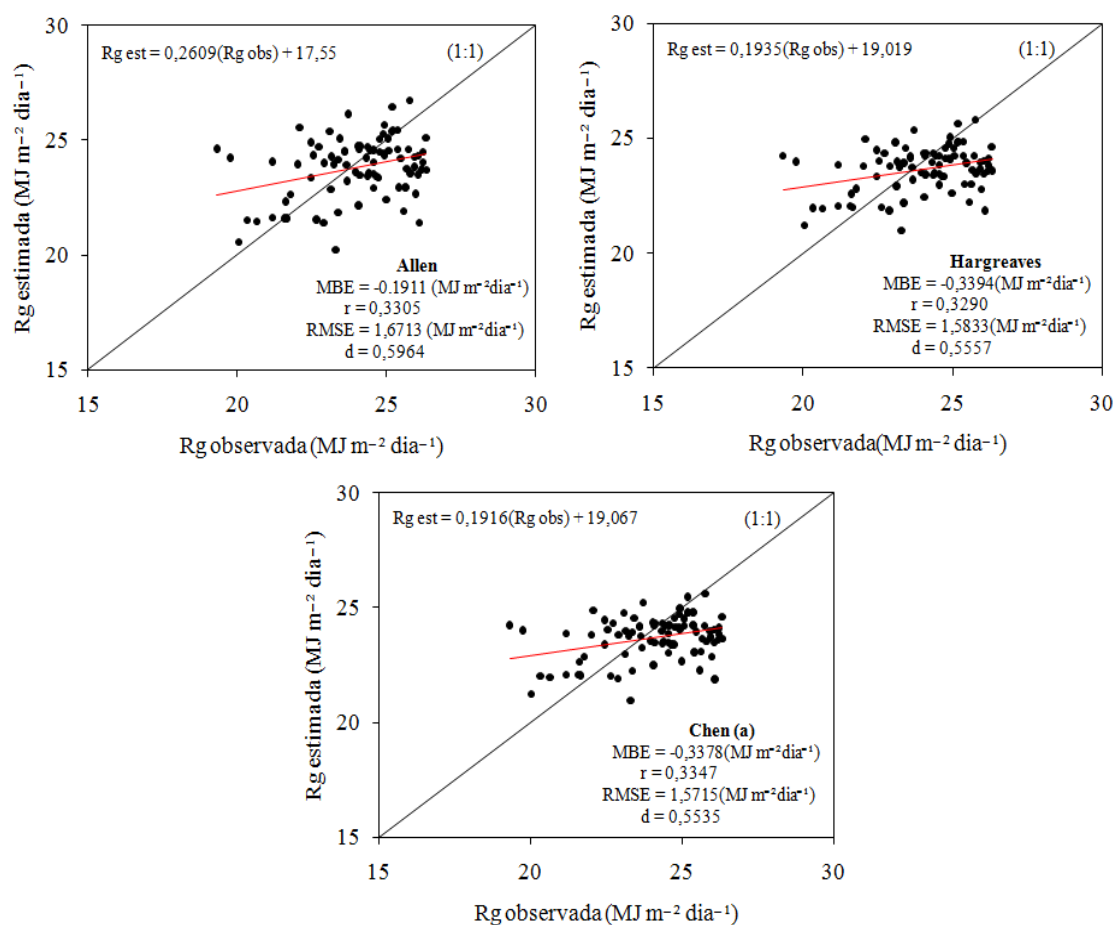


Figura 17. Relação entre a irradiância solar global (Rg) observada e estimada em $MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$ e índices estatísticos MBE, “r”, RMSE e “d” dos modelos de Allen, Hargreaves e Chen para o mês de outubro. A linha diagonal contínua representa a reta de 1:1.

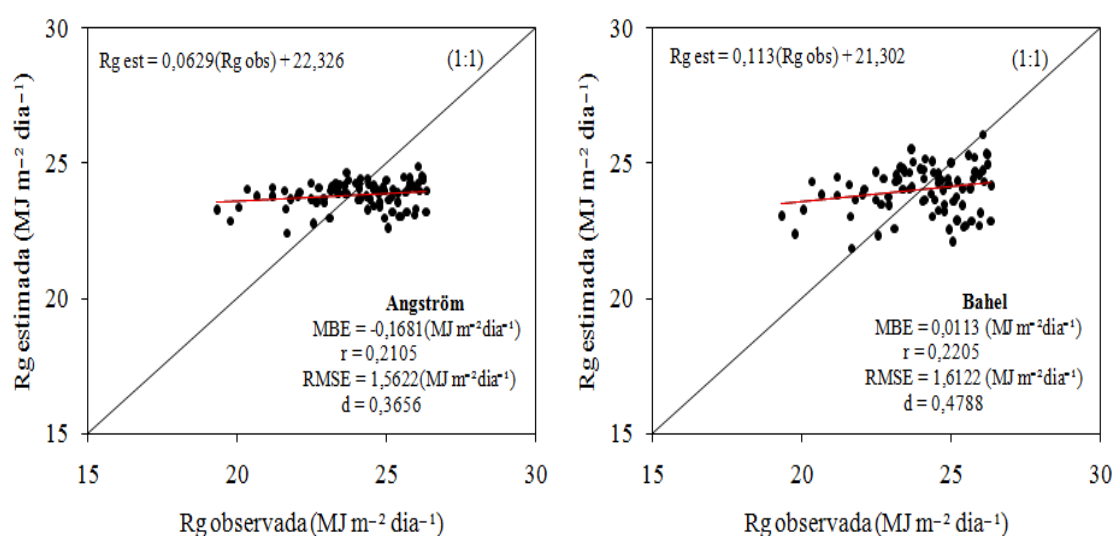


Figura 18. Relação entre a irradiância solar global (Rg) observada e estimada em $MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$ e índices estatísticos MBE, “r”, RMSE e “d” dos modelos de Angström e Bahel para o mês de outubro. A linha diagonal contínua representa a reta de 1:1.

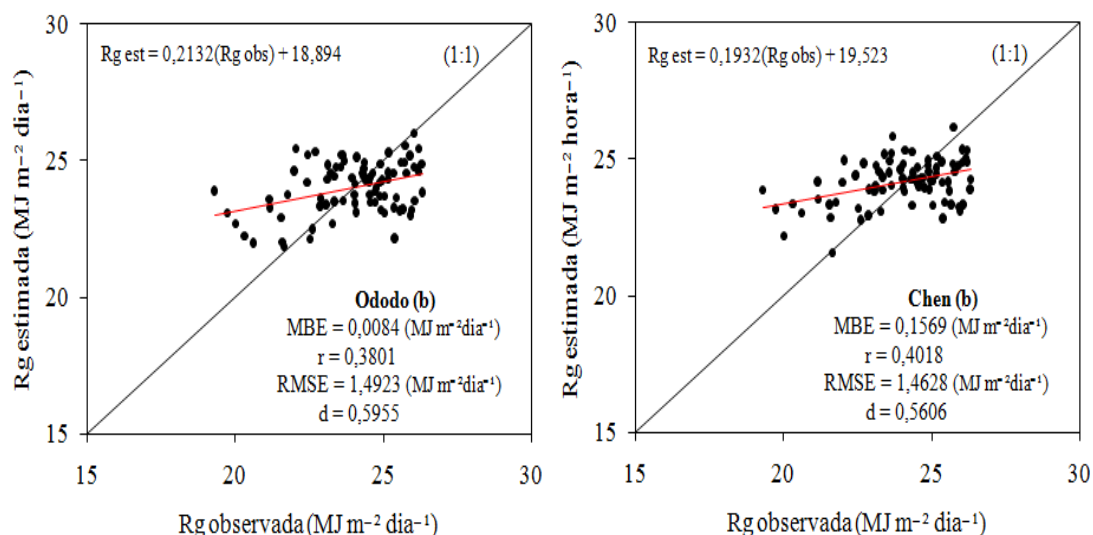


Figura 19. Relação entre a irradiância solar global (Rg) observada e estimada em $MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$ e índices estatísticos MBE, “r”, RMSE e “d” dos modelos de Ododo (b) e Chen (b) para o mês de outubro. A linha diagonal contínua representa a reta de 1:1.

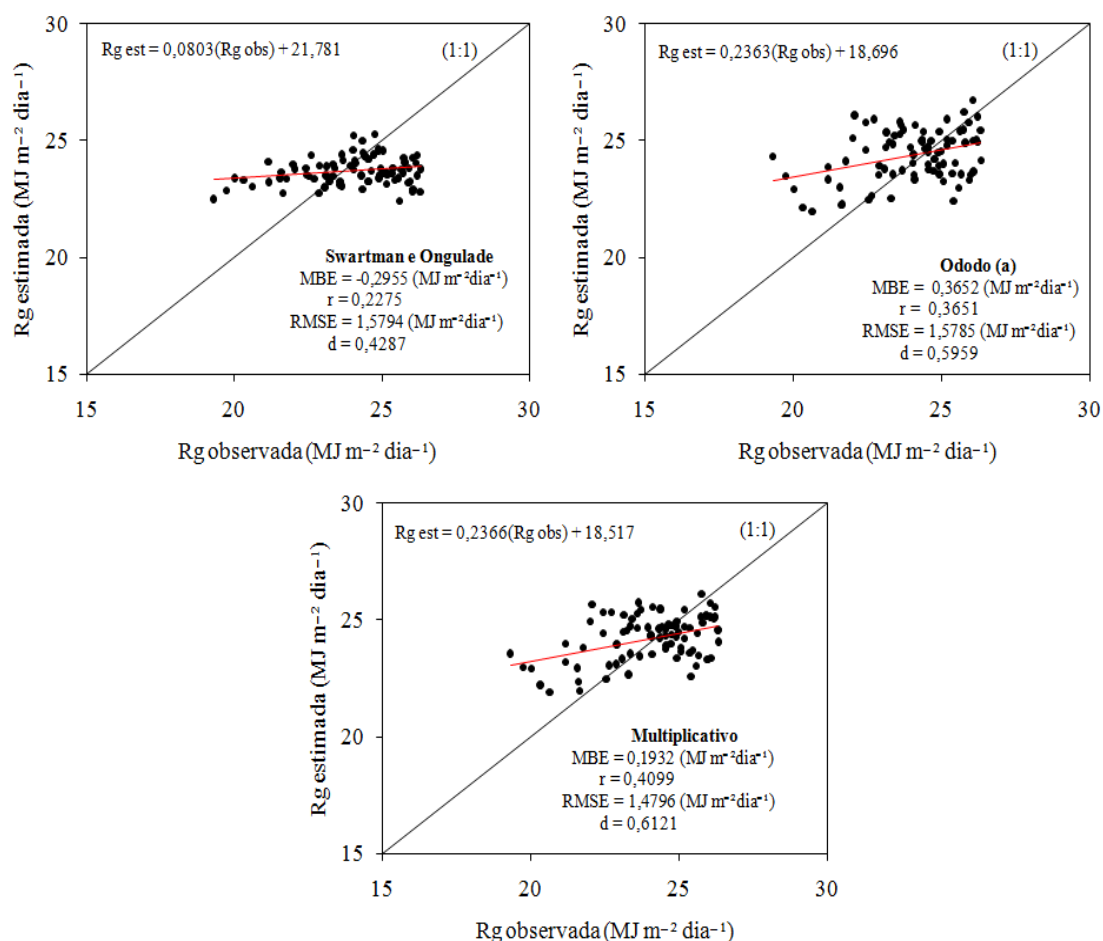


Figura 20. Relação entre a irradiância solar global (Rg) observada e estimada em $MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$ e índices estatísticos MBE, “r”, RMSE e “d” dos modelos de Swartman e Ongulade, Ododo (a) e Multiplicativo para o mês de outubro. A linha diagonal contínua representa a reta de 1:1.

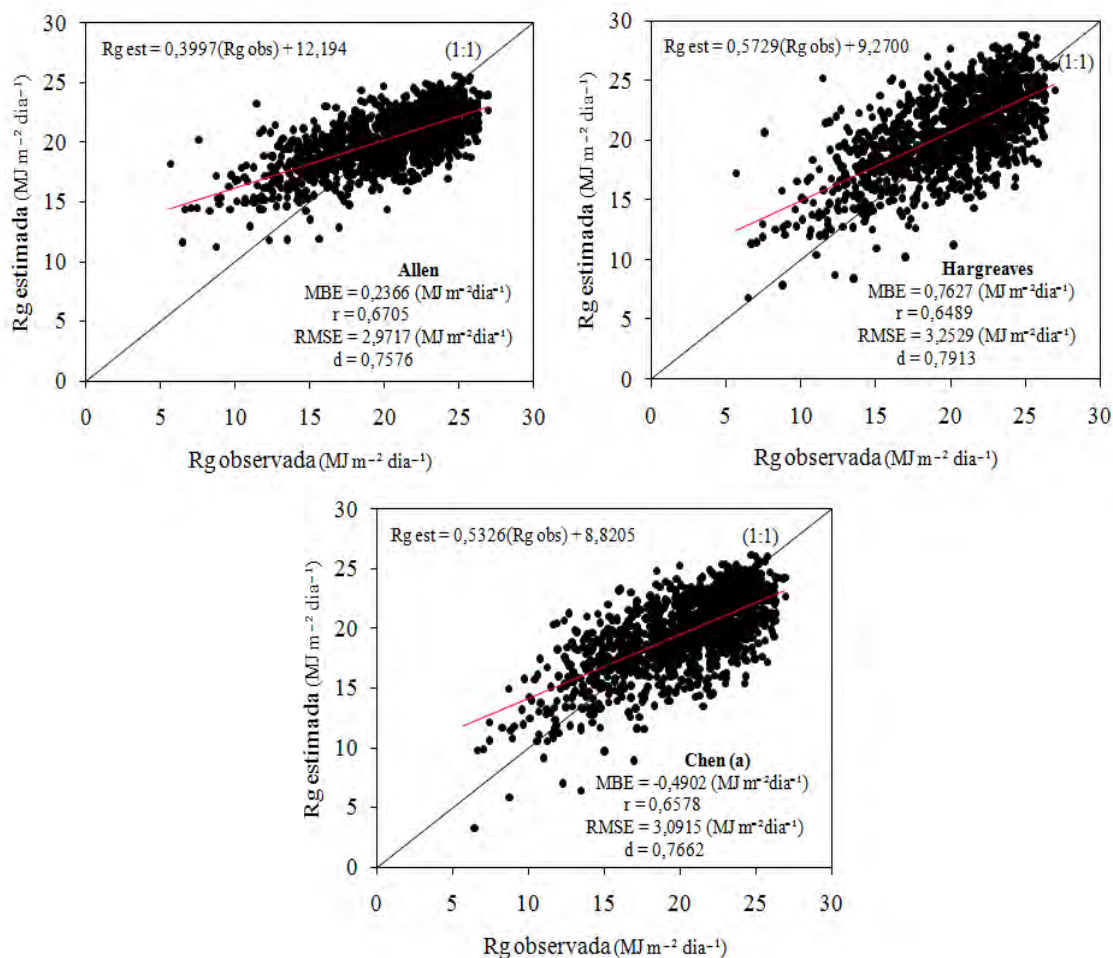


Figura 21. Relação entre a irradiância solar global (R_g) observada e estimada em $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ e índices estatísticos MBE, “r”, RMSE e “d” dos modelos de Allen, Hargreaves e Chen para o período anual. A linha diagonal contínua representa a reta de 1:1.

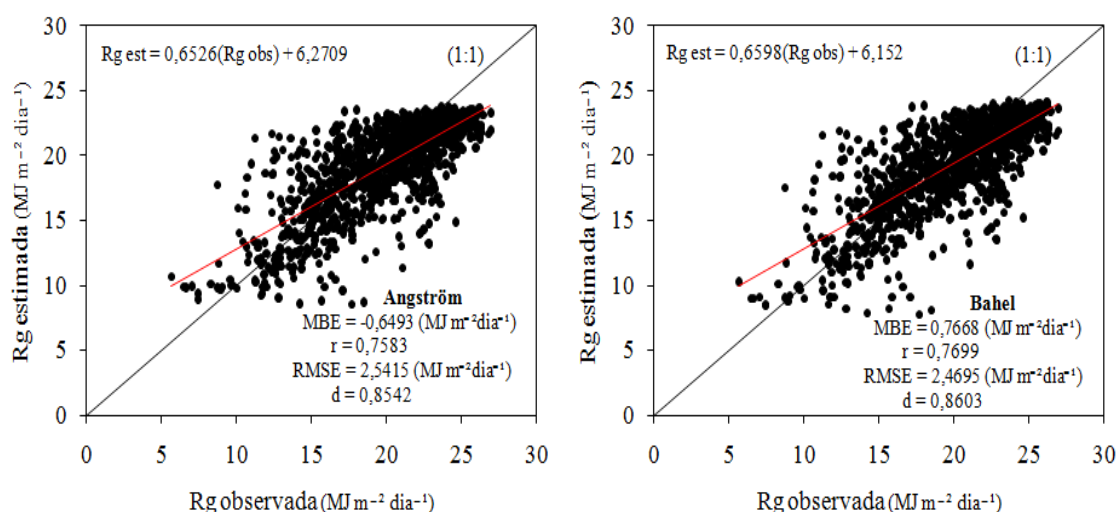


Figura 22. Relação entre a irradiância solar global (R_g) observada e estimada em $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ e índices estatísticos MBE, “r”, RMSE e “d” dos modelos de Angström e Bahel para o período anual. A linha diagonal contínua representa a reta de 1:1.

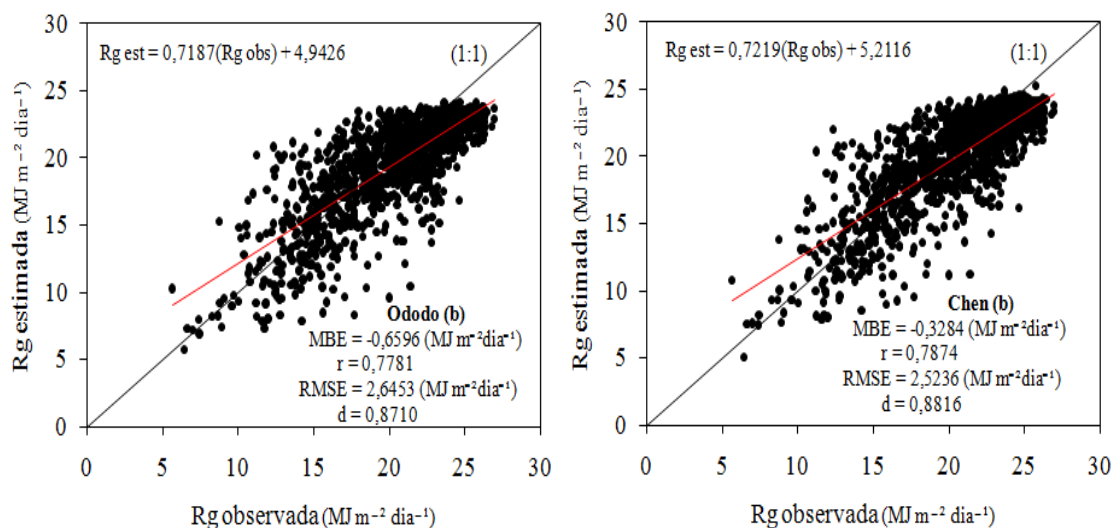


Figura 23. Relação entre a irradiância solar global (Rg) observada e estimada em $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ e índices estatísticos MBE, “r”, RMSE e “d” dos modelos de Ododo (b) e Chen (b) para o período anual. A linha diagonal contínua representa a reta de 1:1.

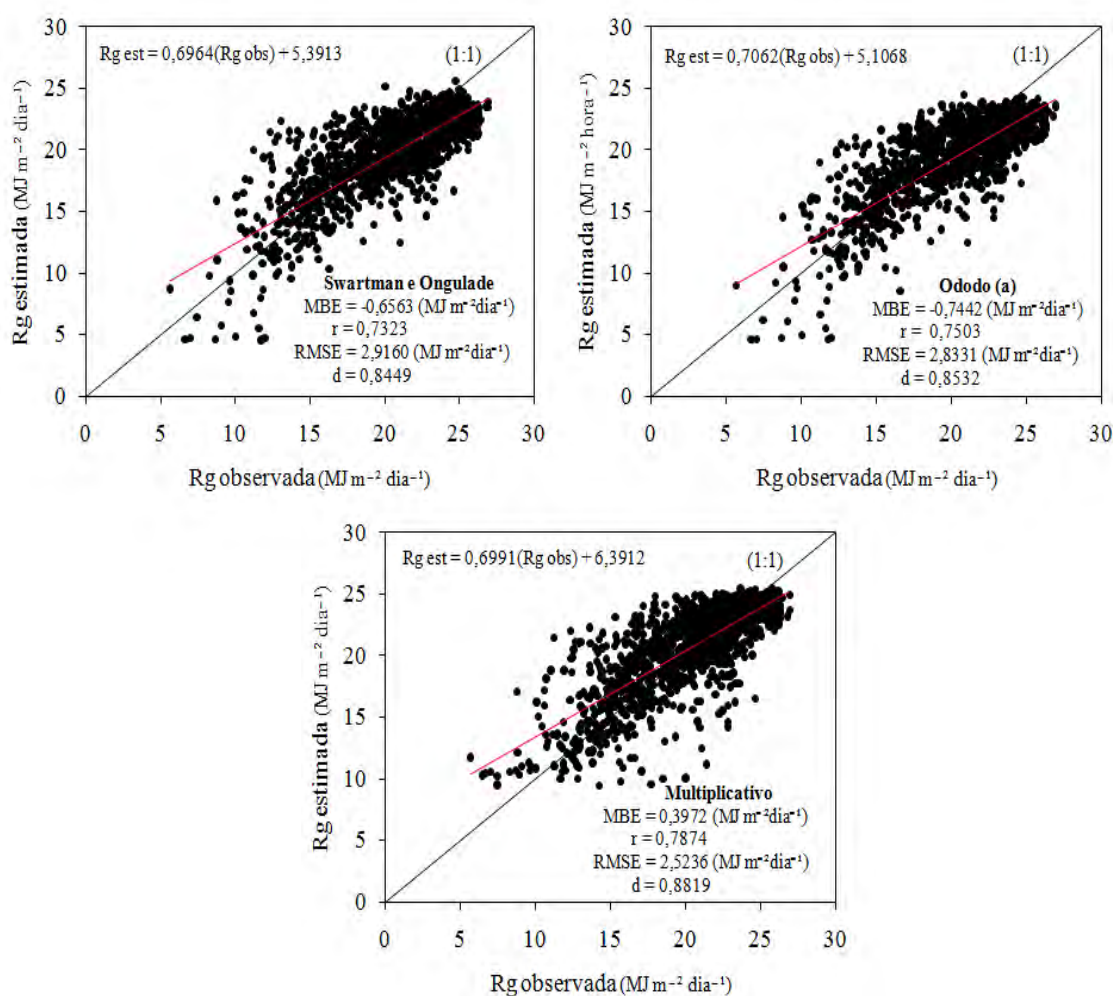


Figura 24. Relação entre a irradiância solar global (Rg) observada e estimada em $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ e índices estatísticos MBE, “r”, RMSE e “d” dos modelos de Swartman e Ongulade, Ododo (a) e Multiplicativo para o período anual. A linha diagonal contínua representa a reta de 1:1.

4.3. Análise mensal da irradiância solar global

Os modelos obtidos através da ACP foram comparados com os modelos de Allen, Hargreaves, Angström, Swartmam e Ongulade, Ododo (a e b), Chen (a e b) e Multiplicativo (Tabelas de 9 a 17).

Comparando-se os modelos convencionais com os obtidos pela ACP, observa-se que esses foram inferiores aos da ACP, principalmente em relação a significância do modelos através do teste “t”, em que apenas o modelo de Allen alcançou resultados semelhantes, porém inferior na sua exatidão (“d”). Vale destacar que, ainda que embora alguns modelos tenham obtidos altos valores para o “d”, estes também obtiveram altos RMSE e MBE, denotando que suas estimativas estão sujeitas a grande variação, que pode levar a interpretações tendenciosas principalmente quando se utiliza médias mensais.

Conforme relatado por SEN e CEBECI (2008), a ACP fornece melhores estimativas da R_g em relação a outros modelos, como observado neste trabalho. Os resultados inferiores obtidos pelos outros modelos pode ser explicado pela baixa quantidade de dados utilizada (quatro anos) para elaboração desses modelos, indicando que a ACP necessita de uma menor quantidade de dados para fornecer bons resultados.

Os resultados da ACP encontram-se nas Tabelas de 18 a 29, nas quais estão contidos os valores dos coeficientes juntamente com respectivos erro padrão e significância dos parâmetros através do teste “t”, e abaixo o modelo obtido juntamente com as componentes principais e seus autovetores. Foram construídos gráficos da relação entre os valores de irradiância solar global observada e estimada pelo modelo com respectivos índices estatísticos.

De modo geral, os modelos apresentaram bons desempenhos para estimativa da irradiância solar global para a região em questão, entretanto, houve meses em que isso não foi verificado, conforme observado nos meses de março e abril, possivelmente devido a esses meses serem os mais chuvosos, contribuindo assim, para a redução da correlação da R_g com a duração diária de brilho solar, ou seja, os coeficientes obtidos não foram capazes de explicar a transmitância da atmosfera, levando os modelos a superestimativas, que provocaram uma diferença significativa

entre os valores observados e estimado da R_g , como podem ser visto nos gráficos das Figuras 25 e 26.

A maioria dos coeficientes de regressão (β_0 , β_1 e β_2) foram não significativos para os modelos de regressão, contudo, manteve-se todas as componentes por não alterar os resultados significativamente com sua retirada, e por coerência ao modelo elaborado para a R_g .

Os modelos em sua maioria superestimaram os valores de R_g , exceto nos meses de Junho (Figura 26), Novembro e Dezembro (Figura 28) quando ocorreram subestimativas. Os RMSE's encontrados considerando todo o período de estudo variaram entre 1,55 a 3,34 ($\text{MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$). Por outro lado, o erro médio de estimativa (MBE) variou entre -0,004 a 1,89 ($\text{MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$). O indicador MBE fornece o desempenho do modelo a longo prazo, indicando que em média o modelo tanto superestimou quanto subestimou os valores de R_g .

Tabela 9. Coeficientes mensais do modelo de Allen para estimativa da irradiância solar global horária e respectivos índices estatístico

Mês	a	MBE	r	RMSE	"d"
Janeiro	0,1734	0,5491	0,5734	3,5471	0,6366
Fevereiro	0,1808	0,5767	0,5558	3,5572	0,6437
Março**	0,1735	2,3169	0,0596	4,7171	0,4124
Abril	0,1730	-0,3001	0,5313	3,1087	0,6315
Maio	0,1808	-0,0786	0,5227	2,8271	0,6199
Junho**	0,1694	0,5323	0,6960	2,5107	0,7601
Julho	0,1659	-0,1095	0,7165	2,4055	0,7813
Agosto	0,1688	0,1696	0,5354	2,3499	0,6336
Setembro	0,1776	0,0848	0,4538	1,7654	0,6334
Outubro	0,1852	-0,2040	0,3305	1,6724	0,5960
Novembro	0,1890	-0,2192	0,5455	1,4401	0,7402
Dezembro**	0,1812	1,1563	0,4463	2,7887	0,5900

(**) denota que houve diferença significativa pelo teste "t" pareado a 5% de probabilidade.

Tabela 10. Coeficientes mensais do modelo de Hargreaves para estimativa da irradiância solar global horária e respectivos índices estatístico

Mês	a	b	MBE	r	RMSE	"d"
Janeiro**	0,2103	-0,1066	0,9520	0,5738	3,5907	0,6787
Fevereiro	0,1749	0,0185	0,6060	0,5558	3,5676	0,6353
Março**	0,2347	-0,2141	2,5160	0,0576	4,8677	0,4207
Abril	0,0809	0,2794	-0,4151	0,5193	3,2969	0,4495
Maio	0,1894	-0,0276	-0,1114	0,5242	2,8232	0,6320
Junho**	0,2259	-0,1849	0,3245	0,6958	2,4549	0,8141
Julho	0,0525	0,3657	-0,7828	0,7095	3,0486	0,4867
Agosto	0,2862	-0,4203	0,2135	0,5214	2,5227	0,7097
Setembro**	0,9795	-2,7714	3,6163	0,3939	7,5271	0,3322
Outubro	0,3082	-0,4180	0,2304	0,3322	2,1581	0,5977
Novembro**	0,1688	0,0660	-0,2953	0,5476	1,4128	0,7279
Dezembro**	0,3228	-0,4399	1,7033	0,4450	3,4170	0,6232

(**) denota que houve diferença significativa pelo teste “t” pareado a 5% de probabilidade.

Tabela 11. Coeficientes mensais do modelo de Angström para estimativa da irradiância solar global horária e respectivos índices estatístico

Mês	a	b	MBE	r	RMSE	"d"
Janeiro	0,2017	0,5611	0,4718	0,8825	2,8951	0,9129
Fevereiro**	0,4185	0,2345	0,9414	0,8524	2,8269	0,7940
Março**	0,2152	0,5475	0,4726	0,8336	2,5347	0,9073
Abril**	0,2418	0,5153	1,1696	0,7518	2,8877	0,8458
Maio	0,3757	0,2889	0,2050	0,6323	2,5761	0,7478
Junho	0,2171	0,5236	-0,3690	0,6145	3,4939	0,7729
Julho	0,5886	-0,0104	0,4069	0,0604	3,4144	0,1873
Agosto	0,2602	0,4350	-0,0998	0,7071	1,9790	0,8309
Setembro	0,0824	0,6555	-0,1399	0,6430	1,5411	0,7947
Outubro	0,2946	0,4001	-0,1605	0,2105	1,5627	0,3706
Novembro	0,2204	0,4895	0,1534	0,2711	1,6072	0,5130
Dezembro**	-0,0464	0,8434	1,8000	0,6312	3,3258	0,7307

(**) denota que houve diferença significativa pelo teste “t” pareado a 5% de probabilidade.

Tabela 12. Coeficientes mensais do modelo de Swartman e Ongulade para estimativa da irradiância solar global horária e respectivos índices estatístico

Mês	a	b	c	MBE	r	RMSE	"d"
Janeiro	1,8637	0,4474	-0,2369	-0,3477	0,8773	3,1657	0,9019
Fevereiro	0,5676	0,2705	0,0288	0,3975	0,8418	2,3851	0,8825
Março	1,2918	0,5506	-0,1342	0,0327	0,8416	2,5615	0,9106
Abril	0,2129	0,4761	0,2699	0,3303	0,7034	2,7418	0,8339
Maio	0,0697	0,6474	0,5426	-0,3524	0,5932	3,3674	0,7661
Junho**	0,3670	0,6386	0,1618	-1,0525	0,5548	4,6626	0,6921
Julho**	0,5553	0,0138	0,0116	0,3290	0,2790	3,3449	0,1925
Agosto	1,5075	0,4346	-0,1982	-0,1150	0,7247	1,9140	0,8259
Setembro	1,8173	0,7549	-0,2258	0,0258	0,6239	1,5773	0,7848
Outubro	151,7293	0,1308	-1,3343	-0,1855	0,1125	3,4361	0,3816
Novembro	0,1617	0,7835	0,3624	0,0557	0,0425	1,9746	0,4551
Dezembro**	0,4202	1,0528	0,1524	1,7071	0,6127	3,2837	0,7250

(**) denota que houve diferença significativa pelo teste "t" pareado a 5% de probabilidade.

Tabela 13. Coeficientes mensais do modelo de Ododo (a) para estimativa da irradiância solar global horária e respectivos índices estatístico

Mês	a	b	c	d	MBE	r	RMSE	"d"
Janeiro**	0,0792	0,2935	0,7267	-0,1066	0,6582	0,8636	2,7984	0,9111
Fevereiro	0,0891	0,2672	0,3669	0,1593	0,3654	0,8431	2,3600	0,8867
Março**	4,0590	0,5657	-0,2935	-0,1597	-0,5150	0,8424	2,6000	0,9080
Abril**	176,6730	0,3812	-2,2803	0,5301	-1,2474	0,3053	3,8093	0,5353
Maio	0,3409	0,6616	-0,3218	0,4371	-0,3051	0,5975	3,3742	0,7693
Junho**	104,5715	0,6750	-1,0706	-0,2824	-0,9511	0,5353	4,8996	0,6775
Julho	0,0553	-0,0106	0,4301	0,2005	0,3798	0,1613	3,3738	0,2250
Agosto	0,1088	0,3648	0,6420	-0,1152	-0,0740	0,7484	1,8503	0,8302
Setembro	1,7365	0,7551	0,0097	-0,2231	0,0272	0,6256	1,5733	0,7859
Outubro	0,0014	0,2621	2,2668	-0,4628	0,3367	0,3516	2,0847	0,5965
Novembro	0,0583	-0,0065	1,4077	-0,6342	0,1146	0,3723	1,9694	0,6354
Dezembro**	1,4631	1,0495	-0,2539	0,0687	1,7076	0,6104	3,2520	0,7248

(**) denota que houve diferença significativa pelo teste "t" pareado a 5% de probabilidade.

Tabela 14. Coeficientes mensais do modelo de Ododo (b) para estimativa da irradiância solar global horária e respectivos índices estatístico

Mês	a	b	c	d	e	MBE	r	RMSE	"d"
Janeiro	-0,3306	0,7955	0,0196	-0,0004	-0,0126	0,0461	0,8762	2,3400	0,9306
Fevereiro**	0,0132	1,0812	0,0112	-0,0007	-0,0212	0,5924	0,8632	2,2079	0,9159
Março**	1,5951	0,4928	-0,0300	-0,0046	0,0000	-3,2001	0,8514	4,1022	0,8135
Abril**	1,5661	0,3409	-0,0478	0,0039	0,0000	-1,1822	-0,0506	4,3805	0,3357
Maió**	3,6256	0,5007	-0,0780	-0,0107	0,0000	1,0584	0,5185	3,6450	0,7188
Junho	1,0099	0,5687	-0,0198	-0,0024	0,0000	-0,2756	0,5462	3,8941	0,7292
Julho	0,1441	-0,0146	0,0095	0,0020	0,0000	0,3872	0,2123	3,3480	0,2461
Agosto	-2,7500	-0,0868	0,0908	0,0049	0,0000	0,1699	0,3752	3,3945	0,6199
Setembro	0,2952	0,5635	0,0001	-0,0024	0,0000	-0,0310	0,6324	1,5575	0,7895
Outubro**	-1,8715	0,2939	0,0611	0,0019	0,0000	0,6488	0,3847	2,2776	0,6118
Novembro	1,3916	-0,0237	0,0055	-0,0150	0,0000	0,0312	0,3208	2,6747	0,5713
Dezembro**	1,7053	0,8607	-0,0349	-0,0086	0,0000	2,0139	0,5701	3,6447	0,6845

(**) denota que houve diferença significativa pelo teste "t" pareado a 5% de probabilidade.

Tabela 15. Coeficientes mensais do modelo de Chen (a) para estimativa da irradiância solar global horária e respectivos índices estatístico

Mês	a	b	MBE	r	RMSE	"d"
Janeiro**	0,3263	-0,1927	0,8412	0,5855	3,5286	0,6925
Fevereiro	0,2780	-0,0683	0,4633	0,5675	3,5011	0,6699
Março**	-1,0242	2,8604	-11,4555	-0,0507	12,5208	0,3190
Abril	0,1224	0,2531	-0,4507	0,5342	3,2832	0,4593
Maió	0,3048	-0,1306	-0,2121	0,5207	2,8379	0,6446
Junho	0,3647	-0,3102	0,1629	0,6901	2,4869	0,8193
Julho**	0,0925	0,3137	-0,9548	0,6959	3,0682	0,5143
Agosto	0,5113	-0,6997	0,1356	0,5138	2,5667	0,7073
Setembro**	1,6907	-3,5794	3,3411	0,4006	7,2233	0,3469
Outubro	0,5180	-0,6378	0,1506	0,3382	2,1117	0,6044
Novembro**	0,2744	-0,0321	-0,3456	0,5495	1,4116	0,7223
Dezembro**	0,7078	-1,1494	-1,8267	0,4352	4,1610	0,6064

(**) denota que houve diferença significativa pelo teste "t" pareado a 5% de probabilidade.

Tabela 16. Coeficientes mensais do modelo de Chen (b) para estimativa da irradiância solar global horária e respectivos índices estatístico

Mês	a	b	c	d	MBE	r	RMSE	"d"
Janeiro	0,3823	0,2515	0,4868	-0,5270	0,2952	0,7761	2,9664	0,8772
Fevereiro	-0,0006	0,3040	0,4612	0,3110	0,3894	0,8514	2,7654	0,7909
Março**	0,3314	0,3313	0,4350	-0,6526	-3,5134	0,7849	4,4767	0,6681
Abril**	-0,1528	1,7356	0,2211	-0,6557	0,5752	0,7048	3,3652	0,8199
Maio**	-0,0144	-0,0077	-1,3684	0,5401	-2,4808	0,4163	3,9081	0,5483
Junho	-0,1735	0,7428	0,8368	0,4517	-0,6317	0,4640	5,1519	0,6426
Julho**	0,2560	0,0580	0,6275	-0,0712	0,9338	0,7148	2,5668	0,7743
Agosto	0,1582	-1,4377	-0,1829	1,7025	-0,2720	0,7451	1,9564	0,8581
Setembro	0,0617	-0,1436	-2,0394	0,6848	-0,2063	0,6576	1,8215	0,7932
Outubro	0,8955	-0,9697	0,3152	-0,6449	0,2883	0,3098	3,4185	0,5005
Novembro	0,1962	0,1627	0,0670	0,0019	-0,1487	0,5596	1,3544	0,6747
Dezembro**	-0,9987	0,8818	3,0305	2,5329	2,9882	0,1915	7,1311	0,3668

(**) denota que houve diferença significativa pelo teste "t" pareado a 5% de probabilidade.

Tabela 17. Coeficientes mensais do modelo Multiplicativo para estimativa da irradiância solar global e respectivos índices estatístico

Mês	a	b	c	d	MBE	r	RMSE	"d"
Janeiro**	0,5615	0,2014	-0,3933	1,2818	0,5985	0,8804	3,0466	0,9066
Fevereiro**	0,2342	0,4187	-0,1095	1,0773	0,8954	0,8551	2,7827	0,8023
Março**	0,5483	0,2147	0,8483	0,3987	-0,6178	0,8190	2,5926	0,8987
Abril**	0,5155	0,2419	0,6977	0,5081	1,2577	0,7420	2,9059	0,8367
Maio	0,2897	0,3752	-0,1072	1,0740	0,1794	0,6431	2,5445	0,7571
Junho	0,5243	0,2166	0,2178	0,8537	-0,3341	0,5923	3,5652	0,7614
Julho**	0,0542	0,5536	-0,3287	1,2086	0,5930	0,6879	3,0354	0,4511
Agosto**	0,6568	0,0813	0,6667	0,5624	-0,7776	0,6644	2,5316	0,8052
Setembro	0,6568	0,0813	0,6667	0,5624	-0,2117	0,7687	1,3121	0,8749
Outubro	0,4005	0,2943	-0,2397	1,1607	-0,0741	0,2998	1,5123	0,4148
Novembro	0,5032	0,2091	0,1252	0,9203	0,2905	0,2166	1,6674	0,4940
Dezembro**	0,8433	0,0464	-0,1388	1,0983	5,1318	0,6370	5,6339	0,5284

(**) denota que houve diferença significativa pelo teste "t" pareado a 5% de probabilidade.

Tabela 18. Coeficientes da regressão, e respectivos erros padrão e teste “t” do modelo de regressão linear múltipla em componentes principais para o mês de janeiro

Coeficientes	Valor	Erro padrão	Pr > t ⁽¹⁾
β_0	0,9645	0,7926	0,4379
β_1	0,5437	0,1393	0,1502
β_2	-0,7268	0,9188	0,5735

¹Valor do nível de significância dos parâmetros da equação de regressão pelo teste t.

Da Tabela 10, o modelo fica definido como abaixo:

$$\hat{R}g = Ro (0,9645 + 0,5437 Z_1 - 0,7268 Z_2)$$

Z_1 e Z_2 são as componentes principais que correspondem a:

$$Z_1 = 0,9570 (n/N) - 0,2890 (Tmin/Tmax)$$

$$Z_2 = 0,2890 (n/N) + 0,9570 (Tmin/Tmax)$$

Tabela 19. Coeficientes da regressão, e respectivos erros padrão e teste “t” do modelo de regressão linear múltipla em componentes principais para o mês de fevereiro

Coeficientes	Valor	Erro padrão	Pr > t ⁽¹⁾
β_0	1,1722	1,8301	0,6372
β_1	0,2327	0,0703	0,1867
β_2	-0,9480	2,3659	0,7539

¹Valor do nível de significância dos parâmetros da equação de regressão pelo teste t.

Da Tabela 11 o modelo fica definido como abaixo:

$$\hat{R}g = Ro (1,1722 + 0,2327 Z_1 - 0,9480 Z_2)$$

Z_1 e Z_2 são as componentes principais, que correspondem a

$$Z_1 = 0,9940 (n/N) - 0,1131 (Tmin/Tmax)$$

$$Z_2 = 0,1131 (n/N) + 0,9940 (Tmin/Tmax)$$

Tabela 20. Coeficientes da regressão, e respectivos erros padrão e teste “t” do modelo de regressão linear múltipla em componentes principais para o mês de março

Coeficientes	Valor	Erro padrão	Pr > t ⁽¹⁾
β_0	0,9650	0,7931	0,4381
β_1	0,1813	0,4123	0,7360
β_2	-0,8891	0,8332	0,4792

¹Valor do nível de significância dos parâmetros da equação de regressão pelo teste t.

Da Tabela 12 o modelo fica definido como abaixo:

$$\hat{R}g = Ro (0,9650 + 0,1813 Z_1 - 0,8891 Z_2)$$

Z_1 e Z_2 são as componentes principais que correspondem a:

$$Z_1 = 0,9892 (n/N) + 0,1470 (Tmin/Tmax)$$

$$Z_2 = - 0,1470 (n/N) + 0,9892 (Tmin/Tmax)$$

Na Figura 25 observa-se os resultados para o primeiro trimestre do ano. Pelo teste “t”, verificou-se que não houve diferença significativa entre os dados observados e estimados de Rg para os meses de Janeiro e Fevereiro. Por outro lado, no mês de Março a diferença foi significativa, ocasionando uma alta superestimativa como pode ser visto na Figura 25. Este fato indica que o modelo não foi eficaz para o início do período chuvoso na região.

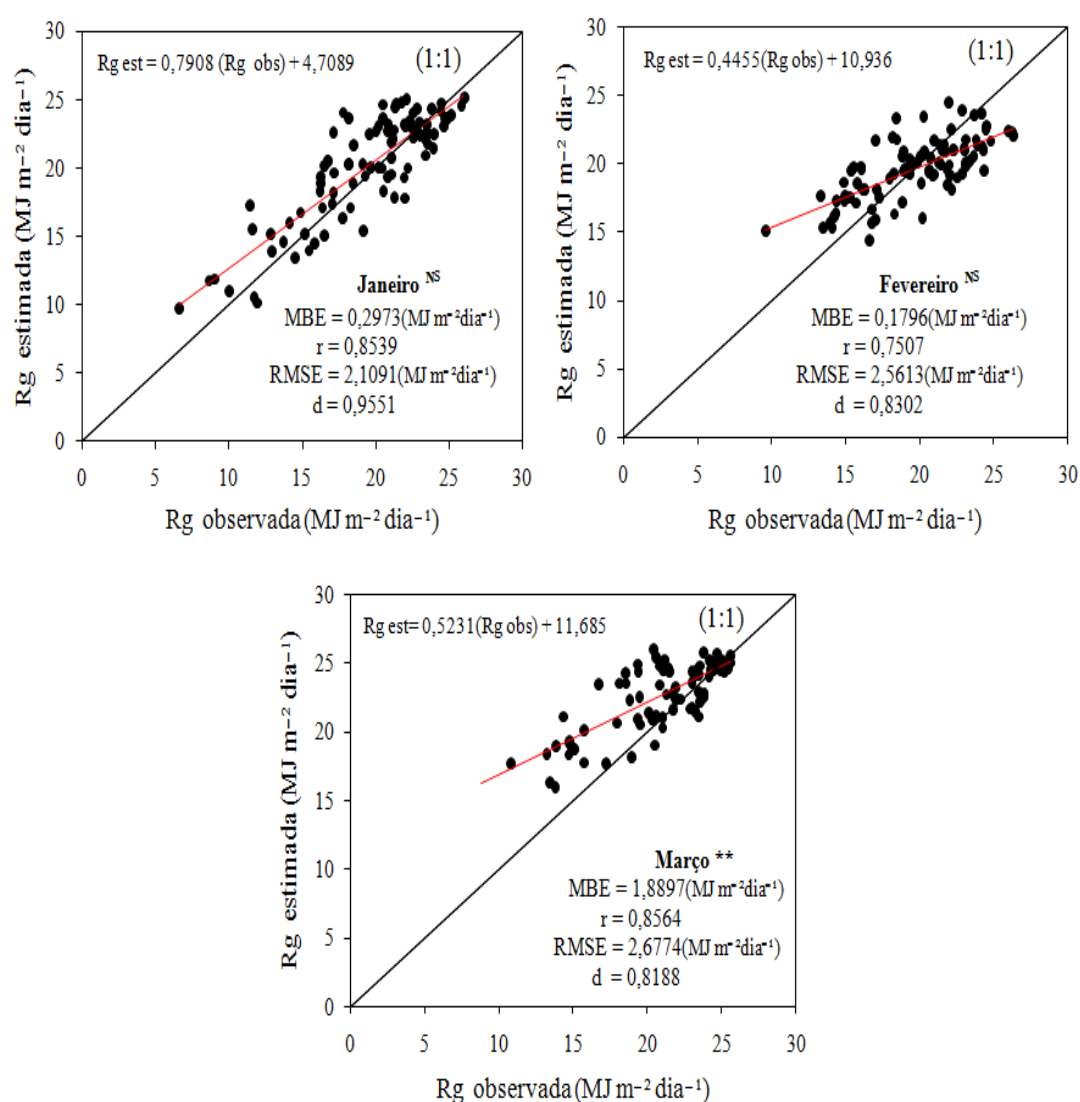


Figura 25. Relação entre a irradiância solar global (Rg) observada e estimada em MJ m⁻²dia⁻¹ e índices estatísticos MBE, “r”, RMSE e “d” dos meses de Janeiro, fevereiro e Março. A linha diagonal contínua representa a reta de 1:1. (NS) denota que não houve diferença significativa pelo teste “t” pareado a 5% de probabilidade. (**) denota que houve diferença significativa pelo teste “t” pareado a 5% de probabilidade.

Tabela 21. Coeficientes da regressão, e respectivos erros padrão e teste “t” do modelo de regressão linear múltipla em componentes principais para o mês de abril

Coeficientes	Valor	Erro padrão	Pr > t ⁽¹⁾
β_0	-0,2855	0,0996	0,2145
β_1	0,4900	0,0316	0,0411
β_2	0,7661	0,1199	0,0994

⁽¹⁾ Valor do nível de significância dos parâmetros da equação de regressão pelo teste t.

Da tabela 13 o modelo fica definido como abaixo:

$$\hat{R}_g = R_o (-0,2855 + 0,4900 Z_1 + 0,7661 Z_2)$$

Z_1 e Z_2 são as componentes principais, que correspondem a:

$$Z_1 = 0,9722 (n/N) - 0,2361 (T_{\min}/T_{\max})$$

$$Z_2 = 0,2361 (n/N) + 0,9722 (T_{\min}/T_{\max})$$

Tabela 22. Coeficientes da regressão, e respectivos erros padrão e teste “t” do modelo de regressão linear múltipla em componentes principais para o mês de maio

Coeficientes	Valor	Erro padrão	Pr > t ⁽¹⁾
β_0	0,4280	2,2490	0,8800
β_1	0,2892	0,1953	0,3791
β_2	-0,0474	3,0171	0,9901

¹Valor do nível de significância dos parâmetros da equação de regressão pelo teste t.

Da tabela 14 o modelo fica definido como abaixo:

$$\hat{R}_g = R_o (0,4280 + 0,2892 Z_1 - 0,0474 Z_2)$$

Z_1 e Z_2 são as componentes principais, que correspondem a:

$$Z_1 = 0,9978 (n/N) - 0,0803 (T_{\min}/T_{\max})$$

$$Z_2 = 0,0803 (n/N) + 0,9978 (T_{\min}/T_{\max})$$

Tabela 23. Coeficientes da regressão, e respectivos erros padrão e teste “t” do modelo de regressão linear múltipla em componentes principais para o mês de junho

Coeficientes	Valor	Erro padrão	Pr > t ⁽¹⁾
β_0	-0,5333	0,5944	0,5345
β_1	0,5095	0,0623	0,0774
β_2	1,0570	0,7432	0,3901

⁽¹⁾ Valor do nível de significância dos parâmetros da equação de regressão pelo teste t.

Da tabela 15 o modelo fica definido como abaixo:

$$\hat{R}_g = R_o (-0,5333 + 0,5095 Z_1 + 1,0570 Z_2)$$

Z_1 e Z_2 são as componentes principais, que correspondem a:

$$Z_1 = 0,9755 (n/N) - 0,2245 (T_{\min}/T_{\max})$$

$$Z_2 = 0,2245 (n/N) + 0,9755 (T_{\min}/T_{\max})$$

Os resultados para o primeiro semestre revelam que para o mês de Abril a diferença entre a Rg observada e estimada foi significativa, assim como ocorreu para o mês de Março, apesar do alto coeficiente de correlação encontrado ($r = 0,8019$), possivelmente devido este mês ser considerado o mais chuvoso na região. Não houve diferença significativa entre os dados observados e estimados de Rg para os meses de Maio e Junho, indicando que para estes meses o modelo foi um bom estimador da Rg, como observa-se na Figura 26.

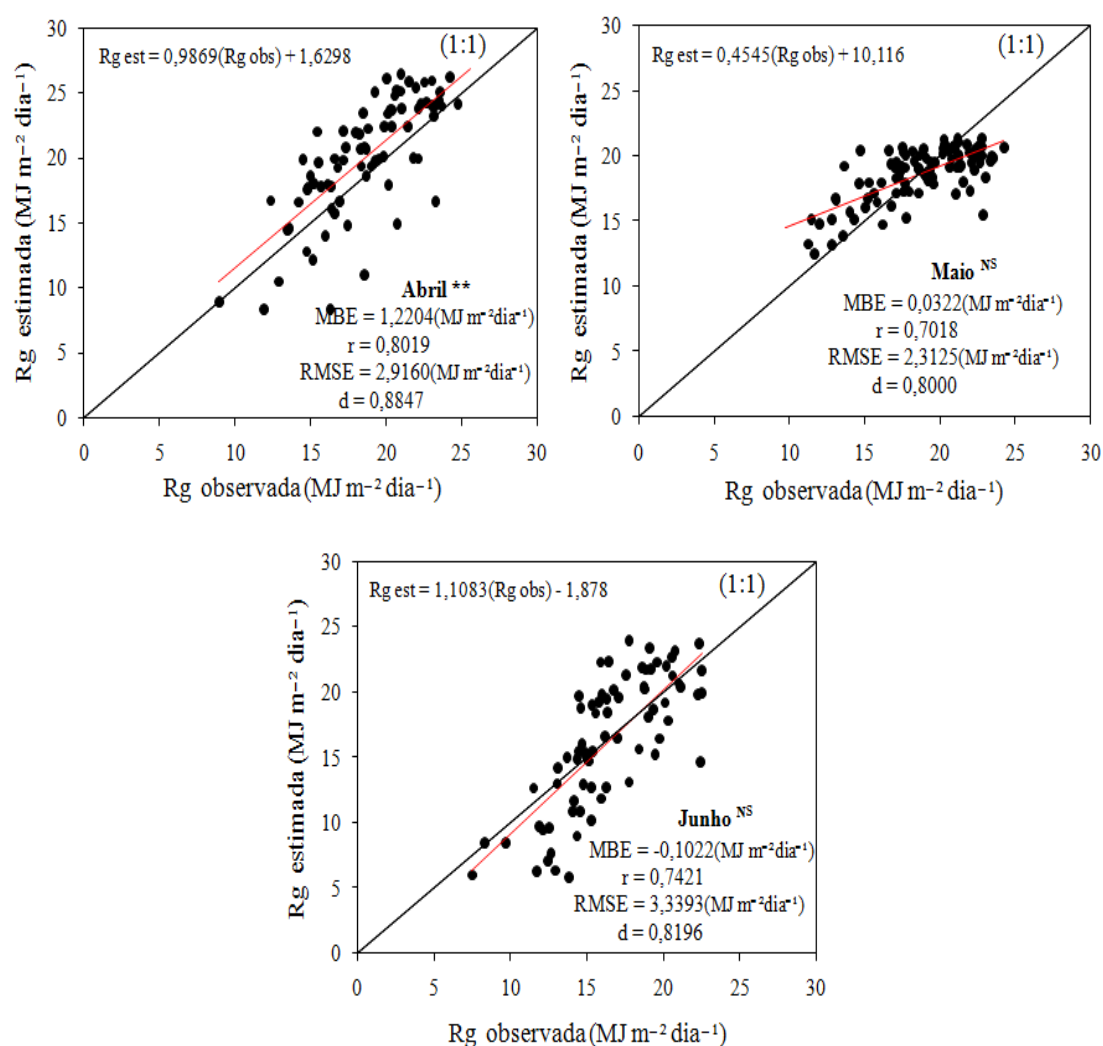


Figura 26. Relação entre a irradiância solar global (Rg) observada e estimada em MJ m⁻²dia⁻¹ e índices estatísticos MBE, “r”, RMSE e “d” dos meses de abril, maio e junho. A linha diagonal contínua representa a reta de 1:1. (NS) denota que não houve diferença significativa pelo teste “t” pareado a 5% de probabilidade e (**) denotam que houve diferença significativa pelo teste “t” pareado a 5% de probabilidade.

Tabela 24. Coeficientes da regressão, e respectivos erros padrão e teste “t” do modelo de regressão linear múltipla em componentes principais para o mês de julho

Coeficientes	Valor	Erro padrão	Pr > t ⁽¹⁾
β_0	1,097	0,0943	0,0781
β_1	0,195	0,0363	0,0439
β_2	-0,939	0,1264	0,0964

¹Valor do nível de significância dos parâmetros da equação de regressão pelo teste t.

Da Tabela 16 o modelo fica definido como abaixo:

$$\hat{R}g = Ro (1,0972 + 0,1955 Z_1 - 0,9391 Z_2)$$

Z_1 e Z_2 são as componentes principais, que correspondem a:

$$Z_1 = 0,9755 (n/N) - 0,2245 (Tmin/Tmax)$$

$$Z_2 = 0,2245 (n/N) + 0,9755 (Tmin/Tmax)$$

Tabela 25. Coeficientes da regressão, e respectivos erros padrão e teste “t” do modelo de regressão linear múltipla em componentes principais para o mês de agosto

Coeficientes	Valor	Erro padrão	Pr > t ⁽¹⁾
β_0	0,4702	0,1150	< 0,0001
β_1	0,4124	0,0435	< 0,0001
β_2	-0,2339	0,1556	0,1367

⁽¹⁾ Valor do nível de significância dos parâmetros da equação de regressão pelo teste t.

Da Tabela 17 o modelo fica definido como abaixo:

$$\hat{R}g = Ro (0,4702 + 0,4124 Z_1 - 0,2339 Z_2)$$

Z_1 e Z_2 são as componentes principais, que correspondem a:

$$Z_1 = 0,9951 (n/N) - 0,0982 (Tmin/Tmax)$$

$$Z_2 = 0,0982 (n/N) + 0,9951 (Tmin/Tmax)$$

Tabela 26. Coeficientes da regressão, e respectivos erros padrão e teste “t” do modelo de regressão linear múltipla em componentes principais para o mês de setembro

Coeficientes	Valor	Erro padrão	Pr > t ⁽¹⁾
β_0	-1,2709	0,8791	0,3852
β_1	0,6556	0,0393	0,0382
β_2	1,9654	1,2527	0,3612

¹Valor do nível de significância dos parâmetros da equação de regressão pelo teste t.

Da Tabela 18 o modelo fica definido como abaixo:

$$\hat{R}g = Ro (-1,27092 + 0,6556 Z_1 + 1,9654 Z_2)$$

Z_1 e Z_2 são as componentes principais, que correspondem a:

$$Z_1 = 0,9982 (n/N) - 0,0571 (Tmin/Tmax)$$

$$Z_2 = 0,0571 (n/N) + 0,9892 (Tmin/Tmax)$$

Para os meses de Julho, Agosto e Setembro, a Figura 27 mostrou que todos os resultados foram satisfatórios para estimativa da R_g , com MBE tendendo a superestimativas variando entre 0,0053 a 0,1667 ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$) e RMSE entre 1,5514 a 2,0252 ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$). Vale ressaltar que nesses meses ocorre a transição do período chuvoso para seco, em que observa-se o aumento gradativo da R_g de Julho para Setembro.

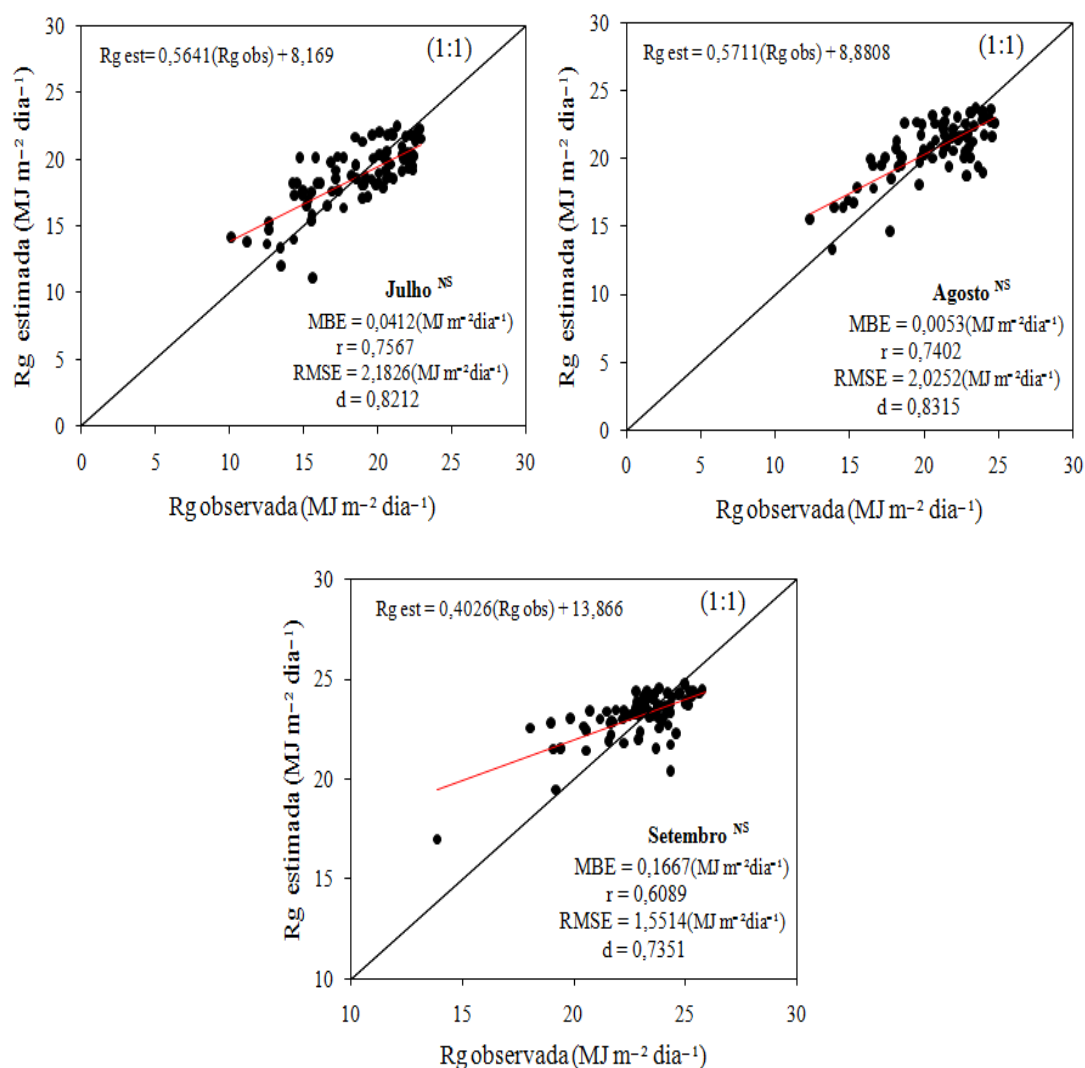


Figura 27. Relação entre a irradiância solar global (R_g) observada e estimada em $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ e índices estatísticos MBE, “r”, RMSE e “d” dos meses de julho, agosto e setembro. A linha diagonal contínua representa a reta de 1:1. (NS) denota que não houve diferença significativa pelo teste “t” pareado a 5% de probabilidade.

Tabela 27. Coeficientes da regressão, e respectivos erros padrão e teste “t” do modelo de regressão linear múltipla em componentes principais para o mês de outubro

Coeficientes	Valor	Erro padrão	Pr > t ⁽¹⁾
β_0	2,7581	3,549	0,580
β_1	0,3914	0,228	0,337
β_2	-2,7913	4,156	0,623

⁽¹⁾Valor do nível de significância dos parâmetros da equação de regressão pelo teste t.

Da Tabela 19 o modelo fica definido como abaixo:

$$\hat{R}g = Ro (2,7581 + 0,3914 Z_1 - 2,7913 Z_2)$$

Z_1 e Z_2 são as componentes principais, que correspondem a:

$$Z_1 = 0,9701 (n/N) - 0,2428 (Tmin/Tmax)$$

$$Z_2 = 0,2428 (n/N) + 0,9701 (Tmin/Tmax)$$

Tabela 28. Coeficientes da regressão, e respectivos erros padrão e teste “t” do modelo de regressão linear múltipla em componentes principais para o mês de novembro

Coeficientes	Valor	Erro padrão	Pr > t ⁽¹⁾
β_0	1,0212	0,129	< 0,0001
β_1	0,4071	0,096	< 0,0001
β_2	-0,6642	0,135	< 0,0001

⁽¹⁾ Valor do nível de significância dos parâmetros da equação de regressão pelo teste t.

Da Tabela 28 o modelo fica definido como abaixo:

$$\hat{R}g = Ro (1,0212 + 0,4071 Z_1 - 0,6642 Z_2)$$

Z_1 e Z_2 são as componentes principais, que correspondem a:

$$Z_1 = 0,9406 (n/N) - 0,3395 (Tmin/Tmax)$$

$$Z_2 = 0,3395 (n/N) + 0,9406 (Tmin/Tmax)$$

Tabela 29. Coeficientes da regressão, e respectivos erros padrão e teste “t” do modelo de regressão linear múltipla em componentes principais para o mês de dezembro

Coeficientes	Valor	Erro padrão	Pr > t ⁽¹⁾
β_0	0,6424	0,1413	< 0,0001
β_1	0,3887	0,0438	< 0,0001
β_2	-0,3922	0,1797	0,0320

⁽¹⁾Valor do nível de significância dos parâmetros da equação de regressão pelo teste t.

Da Tabela 29 o modelo fica definido como abaixo:

$$\hat{R}g = Ro (0,6424 + 0,3887 Z_1 - 0,3922 Z_2)$$

Z_1 e Z_2 são as componentes principais, que correspondem a:

$$Z_1 = 0,9814 (n/N) - 0,1920 (Tmin/Tmax)$$

$$Z_2 = 0,1920 (n/N) + 0,9814 (Tmin/Tmax)$$

Para o último trimestre do ano, o mês de outubro apresentou os maiores erros tanto no MBE quanto no RMSE, e a menor correlação. Vale salientar que esse mês é caracterizado por ter as maiores temperaturas durante o ano, entretanto para esse mesmo mês, o teste “t” pareado indicou que não houve diferença significativa entre os dados observados e estimados, denotando que mesmo com os maiores erros o modelo estimou de forma adequada a Rg. Já para os meses de novembro e dezembro os modelos apresentaram melhores resultados quando comparados com o mês de outubro, como pode ser visto na Figura 28.

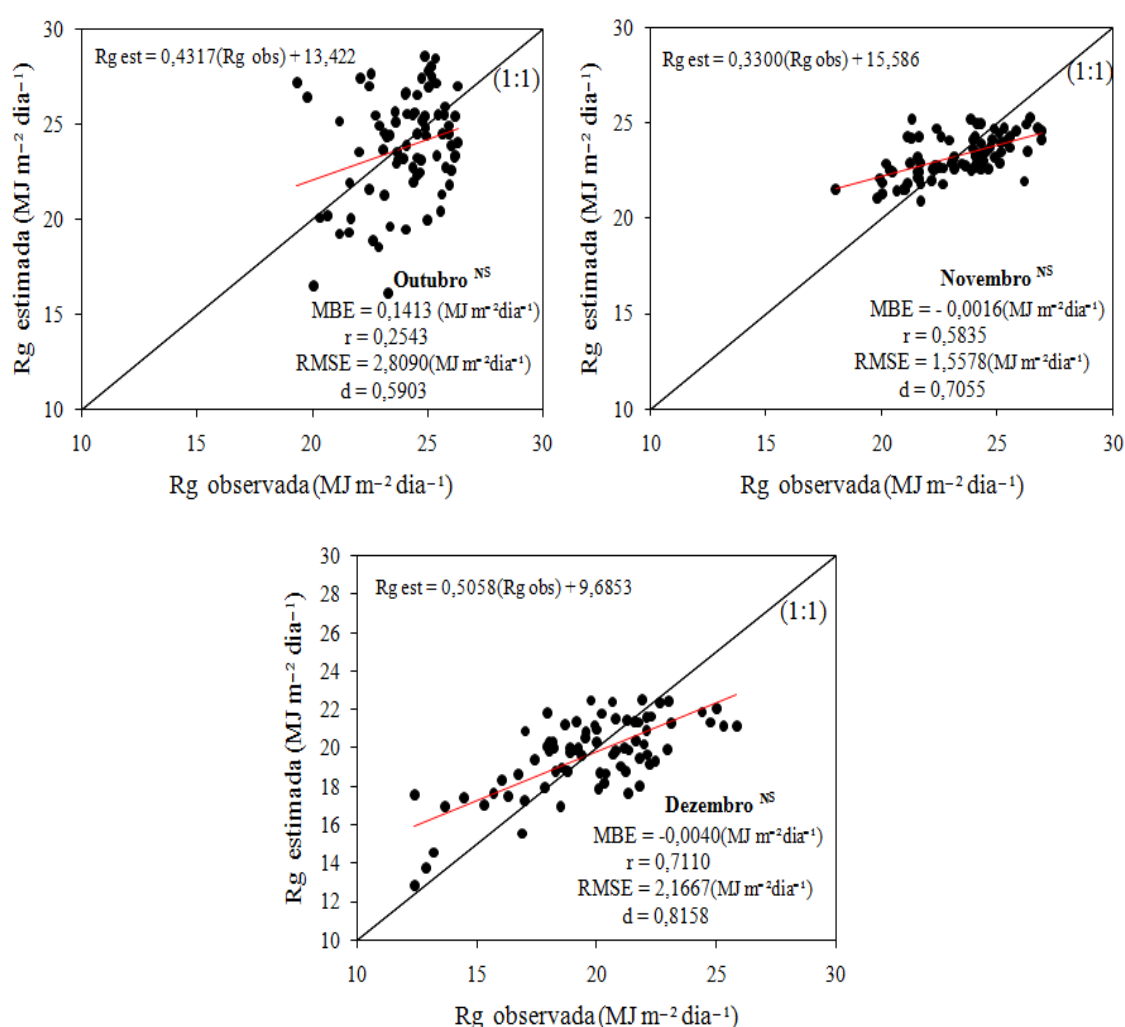


Figura 28. Relação entre a irradiância solar global (R_g) observada e estimada em $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, e índices estatísticos MBE, “r”, RMSE e “d” dos meses de outubro, novembro e dezembro. A linha diagonal contínua representa a reta de 1:1. (NS) denota que não houve diferença significativa pelo teste “t” pareado a 5% de probabilidade.

5. CONCLUSÕES

A parametrização dos modelos estudados requer dados de temperatura, como os modelos de Allen, Hargreaves, Chen e Multiplicativo (a), os quais alcançaram bons resultados para estimativa horária da R_g .

Entre os modelos considerados válidos para Mossoró-RN o modelo Multiplicativo (b) foi o que teve melhor desempenho entre os demais, sugerindo que a duração diária de brilho solar pode favorecer a estimativa horária da R_g .

Os coeficientes indicam uma diferença entre o mês mais chuvoso (abril) e mais quente (outubro), recomendando então que a utilização dos coeficientes por mês para o modelo selecionado, de acordo com os dados disponíveis para estimativa diária da R_g .

A análise anual demonstrou que os modelos de Ododo (b), Chen (b) e Multiplicativo apresentaram os melhores resultados para estimativa diária da R_g .

A análise de componentes principais (ACP) mostrou-se adequada para obtenção dos coeficientes dos modelos de regressão linear múltipla. Por outro lado, os modelos empíricos tradicionais mostraram-se inferiores a ACP.

Os modelos ajustados devem ser utilizados com cautela nos meses de março e abril devido a ocorrência de superestimativas de R_g nesses meses. Nos demais meses, os resultados obtidos sugerem o uso dos modelos resultantes da ACP para estimativa da R_g na região Mossoroense.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAHA, M. G., SAVAGE, M. J. Comparison of estimates of daily solar radiation from air temperature range for application in crop simulations. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.148, p. 401-416, 2007.

ALLEN, R. Self-calibrating method for estimating solar radiation from air temperature. **Journal of Hydrology**, Utah, v. 2, n. 2, p. 56-67, 1997.

ALMOROX, J., BENITO, M., HONTORIA, C. Estimation of monthly Angstrom–Prescott equation coefficients from measured daily data in Toledo, Spain. **Renewable Energy**, Kidlington, v. 30, p. 931–936, 2005.

ANGSTRÖM, A. Solar and terrestrial radiation. **American Meteorology Society**, Washington DC, v. 50, p. 121–126, 1924.

ARAÚJO FILHO, A. G. **Análise Espaço-Temporal do Regime de Chuvas e do Índice de Severidade de Seca de Palmer para o Estado do Rio Grande do Norte**, 56 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia - Fitotecnia) - Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2005.

BADESCU, V. (Ed.). **Modeling Solar Radiation at the Earth's Surface: Recent advances**, London: Springer, 2008, 518p.

BAHEL, V., BAKHSH, H., SRINIVASAN, R. A. correlation for estimation of global solar radiation. **Renewable Energy**, Kidlington, v. 12, p. 131–135, 1987.

BANDYOPADHYAY, A., BHADRA, A. RAGHUWANSHI, N. S., SINGH, R. Estimation of monthly solar radiation from measured air temperature extremes. **Agricultural Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 148, n. 11, p. 1707-1718, 2008.

BARKER, H. W. Solar radiative transfer through clouds *cultural* possessing isotropic variable extinction coefficient. **American Meteorology Society**, Washington DC, v. 118, p. 1145–1162, 1992.

BOISVERT J. B., HAYHOE, H. N., DUBE, P. A. Improving the estimation of global radiation across Canada. **Agricultural Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 51, p. 275–286, 1990.

BRINSFIELD, R., YARAMANOGLU, M., WHEATON, F. Ground level solar radiation prediction model including cloud cover effects. **Solar Energy**, Kidlington, v. 33, p. 493–499, 1984.

BRISTOW, K., CAMPBELL, G. S. On the relation between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature. **Agricultural Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 31, p. 159–166, 1984.

CHEN, R., ERSI, K., YANG, J., LU, S., ZHAO, W. Validation of five global radiation models with measured daily data in China. **Energy Conversion and Management**, London, v. 45, p. 1759–1769, 2004.

CHINEKE, T. C. Equations for estimating global solar radiation in data sparse regions. **Renewable Energy**, Kidlington, v. 33, p. 827–831, 2008.

CONCEIÇÃO, M. A. F., MARIN, F. R. Avaliação de Modelos para a estimativa de valores diários da irradiância solar global com base na temperatura do ar. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 15, n. 1, p. 103–108, 2007.

COOPER, P. I. The absorption of solar radiation in solar stills. **Solar Energy**, Kidlington, v.12, p. 333–46, 1969.

COSTA, E., LEAL, P. A. M., CARMO JÚNIOR, R. R. Modelo de simulação da temperatura e umidade relativa do ar no Interior de estufa plástica. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 24, n. 1, p. 57–67, 2004.

DANTAS, A. A., CARVALHO, L. G. FERREIRA, E. Estimativa da irradiância solar global para a região de Lavras, MG. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 27, n. 6, p. 1260–1263, 2003.

DAVIES, J. A., MCKAY, D. C. Estimating radiation from incomplete cloud data. **Solar Energy**, Kidlington, v. 41, p. 15–18, 1988.

DE JONG, R., STEWART, D. W. Estimating radiation from common meteorological variables in western Canada. **Canadian Journal Plant Science**, Canadá, v. 73, p. 509–518, 1990.

DOORENBOS, J., PRUITT, O. W. **Crop water requirements. Drainage and irrigation**, n.24, Rome: FAO, 1977.

DUCHON, C. E., O'MALLEY, M. S. Estimating cloud type from pyranometer observations. **Journal Applied Meteorology**, v. 38, p. 132–41, 1999.

EDMONDS, J., REILLY, J. A. long-term global economic model of carbon dioxide release from fossil fuel use. **Energy Economy**, v.5, n.74, 1993.

FALAYI, E. O., ADEPITAN J. O., RABIU A. B. Empirical models for the correlation of global solar radiation with meteorological data for Iseyin, Nigeria. **International Journal of Physical Sciences**, India v. 3, n. 9, p. 210–216, 2008.

FORTIN, J. G., ANCTIL, F., PARENT, L. T., BOLINDER, M. A. Comparison of empirical daily surface incoming solar radiation models. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.148, p. 1332–1340, 2008.

FERREIRA, W. P. M. Estimativa da radiação solar global diária em Sete Lagoas, MG baseada em dados de insolação. **Documento 76 Emprapa**, Sete Lagoas, 2008.

GARRATT, J. Incoming Shortwave Fluxes at the Surface—A Comparison of GCM Results with Observations. **Journal of Climate**, v.7, p. 72–80, 1994.

GU, L., FUENTES, J.D., GARSTANG, M., SILVA, J.T., HEITZ R., SIGLER, J. Cloud modulation of surface solar irradiance at a pasture site in southern Brazil. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.106, p.117–29. 2001.

GUISELINI, C., SILVA, I. J. O., PIEDADE, S. M. Avaliação da qualidade do sombreamento arbóreo no meio rural. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 3, n. 3, p. 380–384, 1999.

GUL, M. S., MUNEEER, T. Models for obtaining solar radiation from other meteorological data. **Solar Energy**, Kidlington, v. 64, p. 99–108, 1998.

HAMER, P. J. C. Simulating the irrigation requirements of a greenhouse crop. **Acta Horticulturae**, Tel Aviv, v. 443, p. 147–157, 1997.

HANSEN, J. W. Stochastic daily solar irradiance for biological modeling applications. **Agricultural Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 94, p. 53–63, 1999.

HARGREAVES, G. L., HARGREAVES, G. H., RILEY, P. Irrigation water requirement for the Senegal River Basin. **Journal Irrigation Drainage**, Utah, v. 111, p. 265–275, 1985.

HOEL, M., KVENDOKK, S. Depletion of fossil fuels and the impact of global warming. **Resource Energy Economy**, Laramie, v.18, p.115-125 1996.

HOYT, D. V. Percent of possible sunshine and total cloud cover. **Monthly Weather Review**, v.105, p.648–652, 1978.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), Censo Demográfico de 2000.

IDEMA (Instituto de Defesa do Meio-Ambiente do RN). **Perfil do RN**: Aspectos Físicos. 2001. Disponível em: < <http://www.rn.gov.br/secretarias/idema/perfilm.asp> >. Acesso em: 15 Agosto de 2008.

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

JARVIS, P. G. The interpretation of the variations leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. **Philosophical transactions of the royal society of London**, v. 273, p. 593–610, 1976.

KIMURA, K., STEPHENSON, D. G. **Solar Radiation on Cloudy Days**. Research paper. n. 418. Division of building research, National Research Council, Ottawa, 1969.

KUDISH, A. I., IANETZ, A. Analysis of the solar radiation data for Beer Sheva, Israel, and it's environs. **Solar Energy**, Kidlington, v. 48, p. 97–106, 1992.

LEFEVRE, M., DIABATE, L., WALD, L. Using reduced data sets ISCCP-B2 from the Meteosat satellites to assess surface solar irradiance. **Solar Energy**, Kidlington, v. 81, p. 240–253, 2007.

MANLY, B. J. F. **Métodos estatísticos multivariados** : uma introdução; tradução Sara Ianda Carmona. – 3º. ed. – Porto Alegre: Bookman, 2008, 229p.

MARISCAL, M. J., ORGAZ, F., VILLALOBOS, F. J. Modelling and measurement of radiation interception by olive canopies. **Agricultural Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 100, p. 183–197, 2000.

MARTINEZ-LOZANO, J. A., TENA, F., ONRUBIA, J. E., DE LA RUBIA, J. The historical evolution of the Ångström formula and its modifications: review and bibliography. **Agricultural Forest Meteorology**. Amsterdam, v.33, p. 109-128, 1984.

MINGOTI, S. A. **Análise de dados através de métodos de estatística multivariada**: uma abordagem aplicada, Belo Horizonte: UFMG, 2007, 297p.

MONTGOMERY, D. C., PECK, E. A., VINING, G. G. **Introduction to linear regression analysis** – 3º. ed. – New York: John Wiley, 2001, 641 p.

MUNNER, T. **Solar Radiation and Daylight Models**, Oxford: Elsevier, 2º Ed., 2004. 390p.

NICÁCIO, R. M. **Irradiância solar global e difusa em Maceió Alagoas: Medidas e Modelos**. Univeridade Federal de Alagoas-UFA, Alagoas, Tese, 2002.

NONHEBEL, S. Inaccuracies in weather data and their effects on crop growth simulation results. I. Potential production. **Climate Research**. v. 4, p. 47–60, 1994.

NORDHAUS, W. D. The efficient use of energy resources. Yale University Press, New Haven. 1997.

ODODO, J. C., SULAIMAN, A. T., AIDAN, J., YGUDA, M. M., OGBU, F. A. The importance of maximum air temperature in the parameterisation of solar radiation in Nigeria. **Renewable Energy**, Kidlington, v. 6, p. 751–763, 1995.

PENCKOWSKI, L. H., PODOLAN, M. J., LÓPEZ-OVEJERO, R. F. Influência das condições climáticas no momento da aplicação de herbicidas pós-emergentes sobre a eficácia de controle de nabiça (*raphanus raphanistrum*) na cultura de trigo. **Planta Daninha**, Viçosa, v. 21, n. 3, p. 435–442, 2003.

PEREIRA, A. R., VILLA-NOVA, N. A., SEDIYAMA, G. C. **Evapotranspiração**, Piracicaba: FEALQ, 1997, 183p.

REVFEIM, K. J. A. On the relationship between radiation and mean daily sunshine. **Agricultural Forest Meteorology**, Amsterdam v.86, p.181–191, 1997.

RIETVELD, M. R. A. new method for estimating the regression coefficients in formula relating solar radiation to sunshine. **Agricultural Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 19, n. 3, p. 243–253, 1978.

SEN, Z. **Solar Energy Fundamentals and Modeling Techniques**: Atmosphere, Environment, Climate Change and Renewable Energy, London: Springer-Verlag, 2008. 290p.

SEN, Z., CEBECI, S. M. Solar irradiation estimation by monthly principal component analysis. **Energy Conversion and Management** v.49, p.3129–3134, 2008.

SILVA, T. G. F., ZOLNIER, S., MOURA, M. S. B., SEDIYAMA, G. C. Estimativa e espacialização da umidade relativa do ar para os Estados de Alagoas, Bahia e Sergipe. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 15, n. 1, p. 14–28, 2007.

SOLER, A. Statistical comparison for 77 european of stations of 7 sunshine-based models. **Solar energy**. Kidlington, v. 45, p. 365–370, 1990.

SOUZA, J. L., ESCOBEDO, J. F. Balanço de Irradiância em cultivo de feijão-vagem com e sem cobertura de polietileno. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.32, p.1–15, 1997.

SPOKAS, K., FORCELLA, F. Estimating hourly incoming solar radiation from limited meteorological data. **Weed Science**, EUA, v.54, n.1, p. 182-189, 2006.

SUPIT, I., KAPPEL, R. R. A simple method to estimate global radiation, **Solar energy**, Kidlington, vol. 63, n. 3, p. 147–160, 1998.

SWARTMAN, R. K., OGUNLADE, O. Solar radiation estimates from common parameters. **Solar Energy**, Kidlington, v. 11, p.170–172, 1967.

TIBA, C. **O Recurso solar no Brasil**, Universidade Federal de Pernambuco-UFP: Pernambuco, Tese, 2000.

TRNKA, M., ZALUD, Z., J. EITZINGER, J., DUBROVSKY, M. Global solar radiation in Central European lowlands estimated by various empirical formulae. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 131, p. 54–76, 2005.

TSUR, Y., ZEMEL, A. Pollution control in an uncertain environment. **Journal Economy Dynamic Control** 22:967 1998.

WEYANT, J. P. Cost of reducing global carbon emission. **Journal Economy Perspect**, v.7, n.27, 1993.

WHILLIER, A. The determination of hourly values of total radiation from daily summations. **Arch. Met. Geoph. Biokl.**, Serie B, v.7, p.197-209, 1956.

WILLMOTT, C. J. et al. Statistics for the evaluation and comparisons of models. **Journal of Geophysical Research**, Ottawa, v. 90, n. 5, p. 8995–9005, 1985.

ZOLNIER, S., GATES, R. S., GENEVE, R. L., BUXTON, J. W. Surface diffusive resistances of rooted poinsettia cuttings under controlled-environment conditions. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 44, n. 6, p. 1779–1787, 2001.

ZWEIBEL, K., MASON, J., FTHENAKIS, V. Perspectivas para a energia solar. **Scientific American** (Brasil), São Paulo, n. 69, p. 34–45, 2008.

APÊNDICE

Tabela 1. Coeficientes e respectivos índices estatísticos do modelo de Allen

Mês	a	desvio padrão	MBE	r	RMSE	"d"
Janeiro	0,1772	±0,0028	0,9853	0,5734	3,6342	0,6381
Fevereiro	0,1819	±0,0025	0,6976	0,5558	3,5779	0,6438
Março	0,1750	±0,0027	2,5133	0,0596	4,8176	0,4211
Abril	0,1749	±0,0026	-0,0963	0,5313	3,0944	0,6345
Maiο	0,1813	±0,0019	-0,0279	0,5227	2,8259	0,6208
Junho	0,1709	±0,0022	0,6818	0,6960	2,5439	0,7585
Julho	0,1670	±0,0016	0,0113	0,7165	2,4008	0,7827
Agosto	0,1698	±0,0016	0,2932	0,5354	2,3608	0,6326
Setembro	0,1780	±0,0018	0,1367	0,4538	1,7693	0,6316
Outubro	0,1853	±0,0016	-0,1911	0,3305	1,6713	0,5964
Novembro	0,1897	±0,0016	-0,1338	0,5455	1,4341	0,7418
Dezembro	0,1816	±0,0019	1,2021	0,4463	2,8064	0,5891
Anual	0,1772	±0,0006	0,2366	0,6705	2,9717	0,7576

Tabela 2. Coeficientes e respectivos índices estatísticos do modelo de Hargreaves

Mês	a	desvio padrão	b	desvio padrão	MBE	r	RMSE	"d"
Janeiro	0,2771	±0,0283	-0,3093	±0,0871	1,3317	0,5741	3,7483	0,7201
Fevereiro	0,2482	±0,0282	-0,2094	±0,0887	0,3130	0,5556	3,5520	0,7112
Março	0,2715	±0,0293	-0,3011	±0,0910	4,1592	0,0572	5,9195	0,4426
Abril	0,2647	±0,0228	-0,2741	±0,0693	-0,0427	0,5313	3,1447	0,7121
Maio	0,1842	±0,0256	-0,0092	±0,0822	-0,0354	0,5233	2,8242	0,6250
Junho	0,2669	±0,0225	-0,3154	±0,0734	0,2898	0,6957	2,5426	0,8284
Julho	0,2303	±0,0172	-0,2231	±0,0604	-0,2240	0,7140	2,4172	0,8297
Agosto	0,2198	±0,0176	-0,1795	±0,0631	0,2948	0,5289	2,3911	0,6798
Setembro	0,2771	±0,0235	-0,3093	±0,0810	1,7754	0,4313	2,7345	0,5514
Outubro	0,1375	±0,0216	0,1630	±0,0735	-0,3394	0,3290	1,5833	0,5557
Novembro	0,2133	±0,0216	-0,0775	±0,0707	-0,0590	0,5435	1,4895	0,7480
Dezembro	0,1948	±0,0266	-0,0419	±0,0846	1,2213	0,4461	2,8314	0,5994
Anual	0,2771	±0,0061	-0,3093	±0,0201	0,7627	0,6489	3,2529	0,7913

Tabela 3. Coeficientes e respectivos índices estatísticos do modelo de Chen (a)

Mês	a	desvio padrão	b	desvio padrão	MBE	r	RMSE	"d"
Janeiro	0,4176	±0,0420	-0,3917	±0,0942	1,2758	0,5858	3,6861	0,7281
Fevereiro	0,3855	±0,0419	-0,3090	±0,0956	0,2529	0,5674	3,5485	0,7309
Março	0,4140	±0,0434	-0,3928	±0,0980	3,8470	0,0587	5,6684	0,4443
Abril	0,3545	±0,0303	-0,2536	±0,0669	-0,0277	0,5470	3,0649	0,7060
Maio	0,2967	±0,0398	-0,1082	±0,0926	-0,0752	0,5197	2,8315	0,6392
Junho	0,4275	±0,0352	-0,4517	±0,0832	0,2250	0,6900	2,6228	0,8271
Julho	0,3910	±0,0285	-0,3935	±0,0712	-0,2798	0,6882	2,5834	0,8174
Agosto	0,3799	±0,0296	-0,3588	±0,0753	0,3270	0,5221	2,4099	0,6747
Setembro	0,2999	±0,0392	-0,1266	±0,0970	0,1424	0,4629	1,7449	0,6285
Outubro	0,2296	±0,0354	0,0697	±0,0863	-0,3378	0,3347	1,5715	0,5535
Novembro	0,3496	±0,0347	-0,2065	±0,0819	-0,0537	0,5452	1,4736	0,7475
Dezembro	0,3054	±0,0418	-0,1275	±0,0965	1,1958	0,4371	2,8373	0,5971
Anual	0,3949	±0,0094	-0,3708	±0,0223	-0,4902	0,6578	3,0915	0,7962

Tabela 4. Coeficientes e respectivos índices estatísticos do modelo de Angström

Mês	a	desvio padrão	b	desvio padrão	MBE	r	RMSE	"d"
Janeiro	0,2851	±0,0118	0,4232	±0,0180	0,3800	0,8830	2,1119	0,9369
Fevereiro	0,3124	±0,0127	0,4002	±0,0186	0,5196	0,8525	2,2616	0,9112
Março	0,2635	±0,0120	0,4659	±0,0189	0,2951	0,8335	2,3038	0,9098
Abril	0,2981	±0,0118	0,4130	±0,0196	0,8134	0,7583	2,5415	0,8542
Maiο	0,3282	±0,0126	0,3560	±0,0171	0,0508	0,6457	2,5695	0,7950
Junho	0,2921	±0,0111	0,4069	±0,0160	-0,0347	0,6145	2,9490	0,7882
Julho	0,4304	±0,0177	0,2270	±0,0248	0,4563	0,4918	2,9980	0,5974
Agosto	0,2632	±0,0183	0,4305	±0,0225	-0,1169	0,7069	1,9781	0,8297
Setembro	0,1766	±0,0246	0,5391	±0,0299	-0,2447	0,6470	1,4966	0,7750
Outubro	0,3035	±0,0339	0,3898	±0,0402	-0,1681	0,2105	1,5622	0,3656
Novembro	0,2091	±0,0275	0,5034	±0,0334	0,1834	0,2698	1,6151	0,5178
Dezembro	0,3297	±0,0187	0,3335	±0,0246	1,0881	0,6823	2,3178	0,7561
Anual	0,2693	±0,0044	0,3997	±0,0060	-0,6493	0,7529	2,7314	0,8540

Tabela 5. Coeficientes e respectivos índices estatísticos do modelo de Bahel

Mês	a	desvio padrão	b	desvio padrão	c	desvio padrão	d	desvio padrão	MBE	r	RMSE	"d"
Janeiro	0,2603	±0,0246	0,7096	±0,2170	-0,6898	±0,5024	0,4558	±0,3324	0,3766	0,8867	2,1158	0,9383
Fevereiro	0,3226	±0,0274	0,2644	±0,2106	0,3603	±0,4739	-0,2544	±0,3133	0,5109	0,8510	2,2695	0,9115
Março	0,2073	±0,0331	0,9594	±0,2543	-1,0916	±0,5577	0,6943	±0,3617	0,2897	0,8312	2,3270	0,9087
Abril	0,2668	±0,0197	0,8649	±0,1696	-1,2085	±0,4228	0,8555	±0,2981	0,7669	0,7700	2,4696	0,8603
Maio	0,3199	±0,0254	0,4713	±0,1872	-0,2867	±0,4135	0,1907	±0,2651	0,0501	0,6436	2,5735	0,7929
Junho	0,2995	±0,0215	0,4370	±0,1704	-0,2156	±0,3859	0,2042	±0,2539	-0,0645	0,6213	2,8978	0,7914
Julho	0,5337	±0,0316	-0,5698	±0,2631	1,4263	±0,6187	-0,7296	±0,4111	0,2496	0,4757	3,0070	0,6466
Agosto	0,4618	±0,0808	-0,6684	±0,4509	1,7464	±0,7576	-0,8516	±0,3971	-0,1805	0,7092	2,0028	0,8381
Setembro	0,2937	±0,0714	0,1848	±0,4426	0,1589	±0,8464	0,1113	±0,4928	-0,2933	0,6347	1,5559	0,7820
Outubro	0,2659	±0,1455	1,0137	±0,9295	-1,5868	±1,7005	1,0559	±0,9448	0,0113	0,2205	1,6122	0,4788
Novembro	0,4581	±0,4788	-0,0034	±2,2134	-0,1290	±3,2981	0,4389	±1,5929	0,2787	0,2525	1,7631	0,5622
Dezembro	0,3066	±0,0320	1,1075	±0,2643	-2,1418	±0,5894	1,4830	±0,3712	1,0842	0,6303	2,4348	0,7264
Anual	0,2458	±0,0090	0,6705	±0,0689	-0,6519	±0,1511	0,4307	±0,0964	-0,6245	0,7527	2,7336	0,8553

Tabela 6. Coeficientes e respectivos índices estatísticos do modelo de Swartman e Ongulade

Mês	a	desvio padrão	b	desvio padrão	c	desvio padrão	MBE	r	RMSE	"d"
Janeiro	2,8126	±1,0424	0,3054	±0,0208	-0,3438	±0,0882	0,2074	0,8670	2,6261	0,9190
Fevereiro	0,6132	±0,3366	0,3757	±0,0362	0,0252	±0,1303	0,3779	0,8487	2,2821	0,9164
Março	1,8081	±0,7109	0,3909	±0,0244	-0,2262	±0,0923	0,1646	0,8396	2,2524	0,9134
Abril	5,4180	±5,0113	0,3122	±0,0401	-0,4830	±0,2135	0,8858	0,7772	2,5199	0,8668
Maio	0,6857	±0,3126	0,3250	±0,0296	-0,0112	±0,1066	-0,1012	0,6238	2,7093	0,7832
Junho	1,3736	±0,7185	0,3546	±0,0300	-0,1712	±0,1233	-0,2841	0,5566	3,5217	0,7392
Julho	2,4037	±1,5181	0,1237	±0,0278	-0,3255	±0,1526	0,5446	0,5462	2,9058	0,6210
Agosto	1,8413	±0,5635	0,4345	±0,0334	-0,2459	±0,0758	-0,0094	0,7241	1,9130	0,8285
Setembro	1,7986	±0,6149	0,5986	±0,0521	-0,2311	±0,0846	-0,0593	0,6065	1,5599	0,7606
Outubro	1,7941	±0,8461	0,3939	±0,0529	-0,2387	±0,1156	-0,2955	0,2275	1,5794	0,4287
Novembro	0,4920	±0,2868	0,6427	±0,0530	0,0865	±0,1418	-0,0113	0,2042	1,6578	0,4833
Dezembro	1,3036	±0,8393	0,2387	±0,0294	-0,1763	±0,1554	1,1770	0,6822	2,4048	0,7032
Anual	2,6578	±0,1221	0,3054	±0,0081	-0,3439	±0,0225	-0,6563	0,7323	2,9160	0,8449

Tabela 7. Coeficientes e respectivos índices estatísticos do modelo de Ododo (a)

Mês	a	desvio padrão	b	desvio padrão	c	desvio padrão	d	desvio padrão	MBE	r	RMSE	"d"
Janeiro	0,0792	±0,1312	0,2935	±0,0209	0,7267	±0,3285	-0,1066	±0,1385	0,6582	0,8636	2,7984	0,9111
Fevereiro	0,1680	±0,3501	0,3642	±0,0381	0,2800	±0,4097	0,0973	±0,1850	0,4714	0,8496	2,2928	0,9158
Março	0,2641	±0,4310	0,3829	±0,0266	0,3785	±0,3296	-0,0901	±0,1348	0,7741	0,8371	2,3762	0,9023
Abril	0,3745	±1,1126	0,2976	±0,0436	0,5753	±0,6226	-0,3331	±0,2598	0,9596	0,7730	2,5686	0,8628
Maiο	0,2991	±0,5400	0,3033	±0,0314	0,2652	±0,3611	-0,0346	±0,1529	-0,0299	0,6323	2,6631	0,7866
Junho	0,3606	±0,7241	0,3427	±0,0342	0,2877	±0,4216	-0,0940	±0,1639	-0,2773	0,5712	3,4343	0,7484
Julho	0,0010	±0,0024	0,0708	±0,0251	1,8023	±0,5184	0,0127	±0,1815	-0,0573	0,7581	2,3249	0,7879
Agosto	0,1120	±0,1330	0,3848	±0,0382	0,6943	±0,2845	-0,1656	±0,0817	-0,0097	0,7533	1,8257	0,8421
Setembro	0,0691	±0,0903	0,5615	±0,0523	0,7168	±0,2766	-0,0586	±0,1072	-0,0655	0,7073	1,3658	0,8144
Outubro	0,0033	±0,0043	0,3490	±0,0476	1,3456	±0,2669	0,1327	±0,1305	0,3652	0,3651	1,5785	0,5959
Novembro	0,1908	±0,3113	0,5827	±0,0537	0,3656	±0,2782	0,0006	±0,1900	0,1865	0,3349	1,5632	0,5461
Dezembro	0,2736	±0,6559	0,2402	±0,0299	0,2555	±0,4314	-0,0193	±0,2444	1,0799	0,6912	2,3464	0,7116
Anual	0,0748	±0,0235	0,2935	±0,0083	0,7268	±0,0926	-0,1066	±0,0299	-0,7442	0,7503	2,8331	0,8532

Tabela 8. Coeficientes e respectivos índices estatísticos do modelo Multiplicativo

Mês	a	desvio padrão	b	desvio padrão	c	desvio padrão	d	desvio padrão	MBE	r	RMSE	“d”
Janeiro	0,4235	±0,0180	0,2849	±0,0118	0,0208	±0,0058	0,3036	±0,1935	1,0838	0,8793	2,6465	0,9167
Fevereiro	0,4002	±0,0186	0,3124	±0,0127	0,0044	±0,0049	0,8532	±0,1662	0,5419	0,8532	2,2626	0,9131
Março	0,4664	±0,0189	0,2631	±0,0120	0,0123	±0,0055	0,5880	±0,1839	1,0586	0,8327	2,5524	0,8953
Abril	0,4137	±0,0195	0,2978	±0,0118	0,0366	±0,0074	-0,1827	±0,2398	1,5157	0,7597	3,0297	0,8374
Maio	0,3551	±0,0172	0,3288	±0,0127	0,0020	±0,0046	0,9325	±0,1544	0,0143	0,6476	2,5642	0,7961
Junho	0,4069	±0,0161	0,2921	±0,0111	0,0010	±0,0056	0,9688	±0,1836	-0,0196	0,6182	2,9409	0,7904
Julho	0,2266	±0,0247	0,4307	±0,0177	0,0453	±0,0082	-0,5213	±0,2750	0,2440	0,7175	2,3786	0,8134
Agosto	0,4289	±0,0222	0,2650	±0,0181	0,0101	±0,0052	0,6509	±0,1797	-0,1039	0,7228	1,9369	0,8419
Setembro	0,5384	±0,0300	0,1772	±0,0246	0,0285	±0,0053	0,0592	±0,1831	0,9392	0,7914	1,5726	0,8384
Outubro	0,3899	±0,0402	0,3034	±0,0338	0,0315	±0,0060	-0,1031	±0,2094	0,1932	0,4099	1,4796	0,6121
Novembro	0,5032	±0,0334	0,2091	±0,0275	0,0052	±0,0052	0,8203	±0,1802	0,2430	0,3011	1,6053	0,5411
Dezembro	0,3334	±0,0246	0,3297	±0,0187	0,0023	±0,0065	1,0094	±0,2271	2,9385	0,6879	3,4593	0,6497
Anual	0,3835	±0,0044	0,3093	±0,0060	0,0120	±0,0558	0,5935	±0,0016	0,3972	0,7693	2,6277	0,8711

Tabela 9. Coeficientes e respectivos índices estatísticos do modelo de Ododo (b)

Mês	a	desvio padrão	b	desvio padrão	c	desvio padrão	d	desvio padrão	e	desvio padrão	MBE	r	RMSE	"d"
Janeiro	-0,3006	±0,2926	0,7845	±0,3099	0,0196	±0,0076	-0,0004	±0,0010	-0,0126	±0,0094	0,8782	0,8759	2,4509	0,9232
Fevereiro	0,0132	±0,2458	1,0812	±0,2963	0,0112	±0,0064	-0,0007	±0,0010	-0,0212	±0,0090	0,5924	0,8632	2,2079	0,9159
Março	-0,0359	±0,2441	1,3298	±0,3417	0,0156	±0,0066	-0,0022	±0,0010	-0,0281	±0,0105	0,1482	0,8518	2,2094	0,8940
Abril	-0,3824	±0,1877	1,4947	±0,3646	0,0301	±0,0051	-0,0027	±0,0010	-0,0368	±0,0113	1,0939	0,7883	2,5171	0,8636
Maio	0,2018	±0,3039	0,8139	±0,3444	0,0066	±0,0087	-0,0010	±0,0009	-0,0143	±0,0107	0,2019	0,6595	2,5421	0,8046
Junho	0,4648	±0,2683	0,3192	±0,3523	-0,0034	±0,0079	-0,0009	±0,0008	0,0027	±0,0111	-0,1621	0,6240	2,9331	0,7925
Julho	-1,9004	±0,3244	1,7523	±0,4472	0,0686	±0,0091	0,0018	±0,0011	-0,0490	±0,0134	0,2572	0,7177	2,3785	0,8149
Agosto	0,7159	±0,3536	-0,6709	±0,4402	-0,0102	±0,0103	-0,0012	±0,0007	0,0307	±0,0132	-0,2003	0,7441	1,8662	0,8490
Setembro	0,5642	±0,5215	-0,3693	±0,5669	-0,0093	±0,0151	-0,0007	±0,0010	0,0251	±0,0172	-0,2826	0,6955	1,4222	0,8128
Outubro	-1,4379	±0,7481	1,4456	±0,8791	0,0497	±0,0216	0,0012	±0,0013	-0,0326	±0,0258	0,0084	0,3801	1,4923	0,5955
Novembro	0,7958	±0,9701	-0,2153	±1,1264	-0,0146	±0,0286	-0,0012	±0,0019	0,0205	±0,0337	0,2491	0,3606	1,5563	0,5721
Dezembro	0,8649	±0,5232	-0,1089	±0,5574	-0,0129	±0,0135	-0,0015	±0,0020	0,0129	±0,0164	0,9924	0,6889	2,2630	0,7671
Anual	-0,2839	±0,0761	0,7411	±0,0949	0,0185	±0,0022	-0,0004	±0,0002	-0,0119	±0,0029	-0,6596	0,7781	2,6453	0,8716

Tabela 10. Coeficientes e respectivos índices estatísticos do modelo de Chen (b)

Mês	a	desvio padrão	b	desvio padrão	c	desvio padrão	d	desvio padrão	MBE	r	RMSE	"d"
Janeiro	0,1495	±0,0260	0,3706	±0,0236	0,8813	±0,1382	-0,0277	±0,0587	0,7173	0,8695	2,3670	0,9243
Fevereiro	0,0460	±0,0341	0,3727	±0,0304	1,0374	±0,1654	0,2283	±0,0679	0,4159	0,8587	2,1983	0,9161
Março	0,0607	±0,0322	0,4374	±0,0355	0,9706	±0,1626	0,1405	±0,0623	0,8953	0,8369	2,4031	0,8964
Abril	0,1490	±0,0266	0,3129	±0,0237	1,3644	±0,2230	0,0515	±0,0469	0,7250	0,7562	2,5397	0,8571
Maiο	0,0410	±0,0275	0,3401	±0,0262	0,9823	±0,1436	0,2430	±0,0613	-0,0175	0,6642	2,5074	0,8044
Junho	0,0664	±0,0313	0,3560	±0,0249	1,2002	±0,1574	0,1835	±0,0645	-0,0814	0,7004	2,5375	0,8352
Julho	0,3846	±0,0358	-0,0408	±0,0630	0,0002	±0,2091	-0,3121	±0,1153	0,5255	0,6888	2,6061	0,8129
Agosto	0,1635	±0,0266	0,2672	±0,0309	1,5974	±0,3683	0,0006	±0,0607	-0,0595	0,7447	1,8532	0,8466
Setembro	0,0868	±0,0272	0,3796	±0,0342	1,9096	±0,3788	0,1395	±0,0655	-0,0902	0,6758	1,4451	0,8090
Outubro	0,1399	±0,0301	0,2533	±0,0361	2,1345	±0,7560	0,1122	±0,0767	0,1569	0,4018	1,4628	0,5606
Novembro	0,0962	±0,0363	0,2664	±0,0275	3,4415	±0,9346	0,2501	±0,0804	0,3301	0,4032	1,5904	0,6352
Dezembro	0,1412	±0,0380	0,3501	±0,0283	0,8813	±0,3462	-0,0262	±0,0824	0,8589	0,7115	2,1682	0,8112
Anual	0,1412	±0,0080	0,3501	±0,0083	0,8813	±0,0638	-0,0262	±0,0173	-0,3284	0,7874	2,5236	0,8819

Modelo de Allen

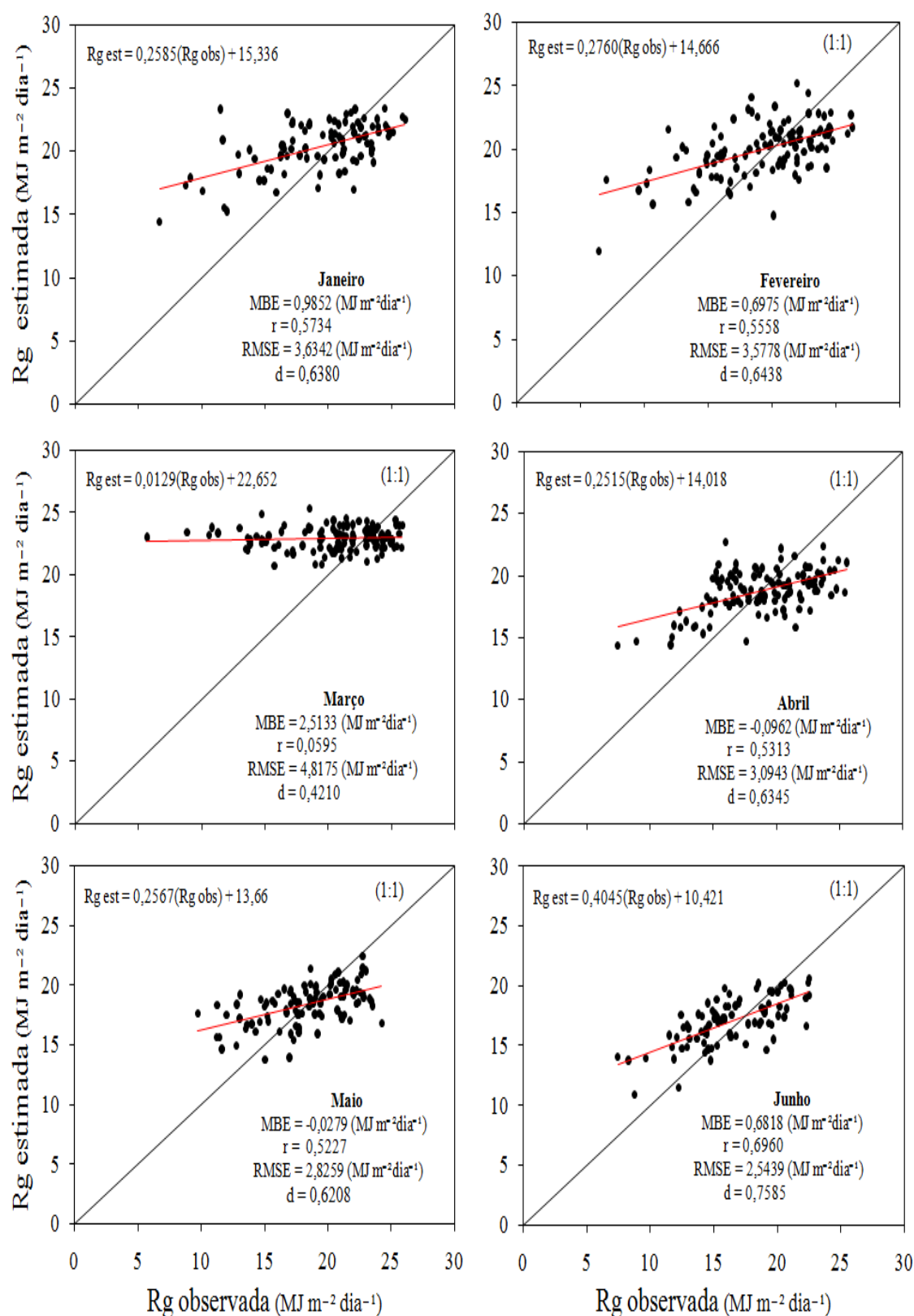


Figura 1. Relação entre a irradiância solar global (R_g) observada e estimada em $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ e índices estatísticos MBE, “r”, RMSE e “d” dos meses de janeiro, fevereiro, março, abril, maio e junho para o modelo de Allen. A linha diagonal contínua representa a reta de 1:1.

continuação,

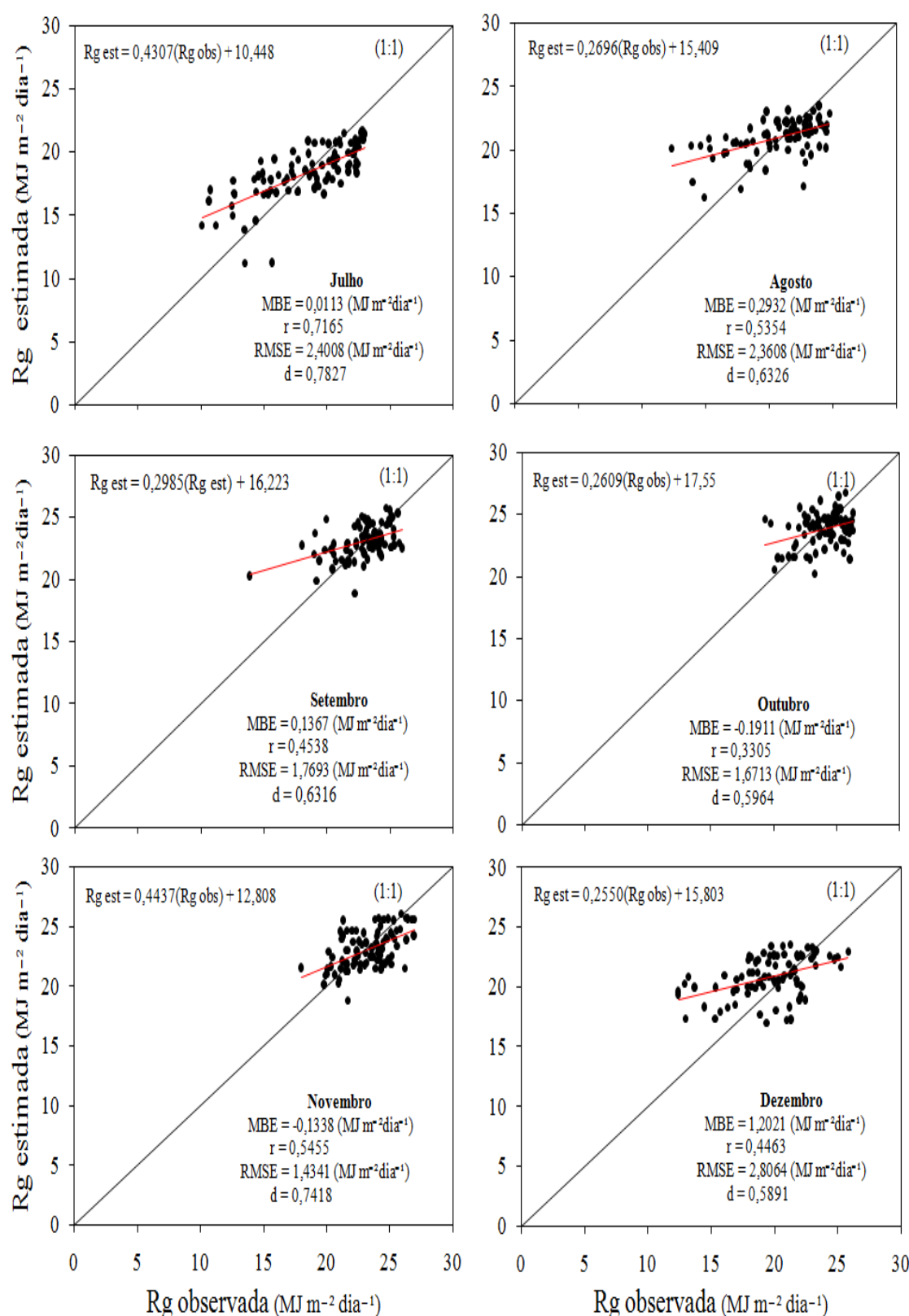


Figura 2. Relação entre a irradiância solar global (R_g) observada e estimada em $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ e índices estatísticos MBE, “r”, RMSE e “d” dos meses de julho, agosto, setembro, outubro, novembro e dezembro para o modelo de Allen. A linha diagonal contínua representa a reta de 1:1.

Modelo de Hargreaves

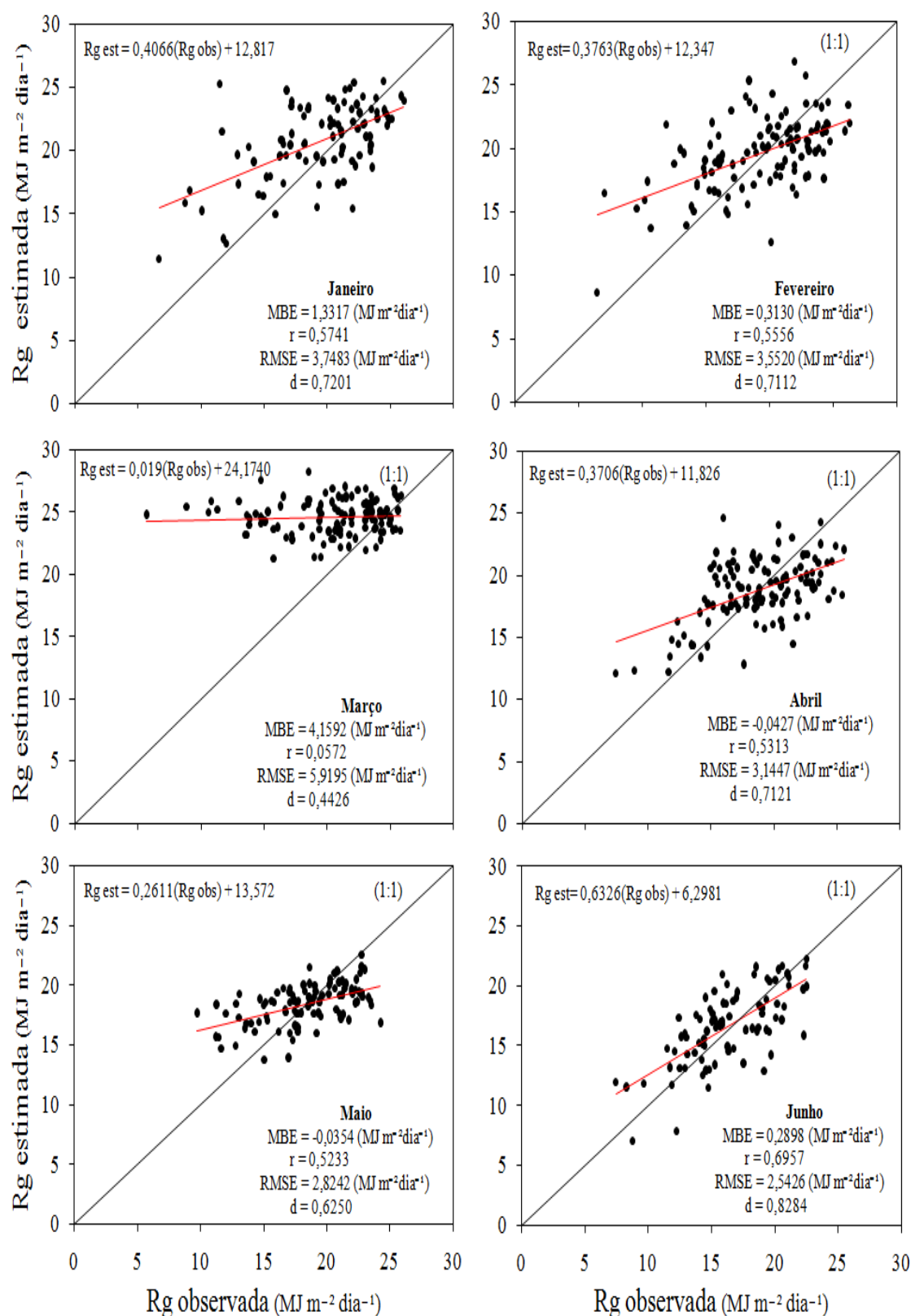


Figura 3. Relação entre a irradiância solar global (R_g) observada e estimada em $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ e índices estatísticos MBE, “r”, RMSE e “d” dos meses de janeiro, fevereiro, março, abril, maio e junho para o modelo de Hargreaves. A linha diagonal contínua representa a reta de 1:1.

continuação,

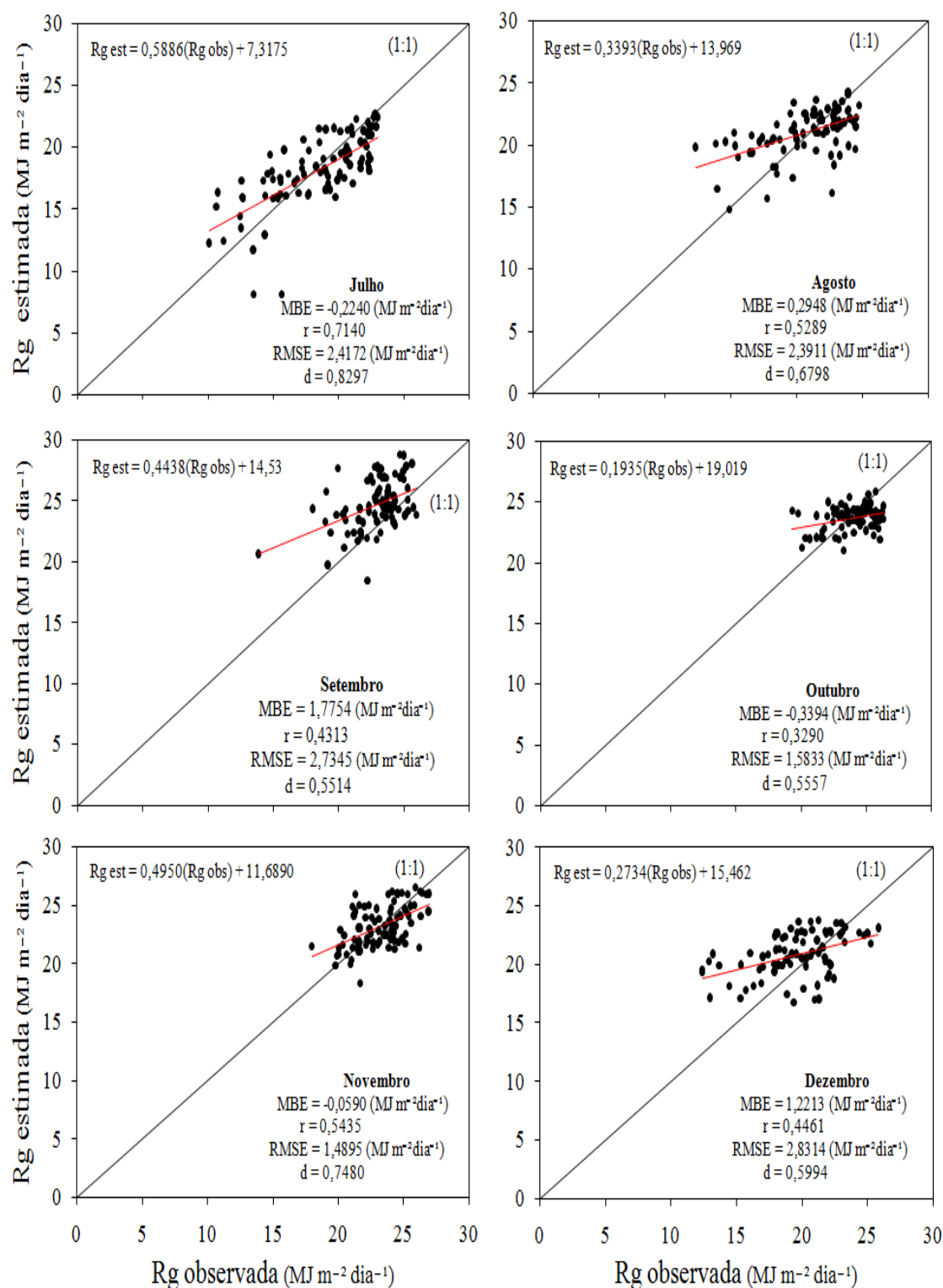


Figura 4. Relação entre a irradiância solar global (R_g) observada e estimada em $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ e índices estatísticos MBE, “r”, RMSE e “d” dos meses de julho, agosto, setembro, outubro, novembro e dezembro para o modelo de Hargreaves. A linha diagonal contínua representa a reta de 1:1.

Modelo de Angström

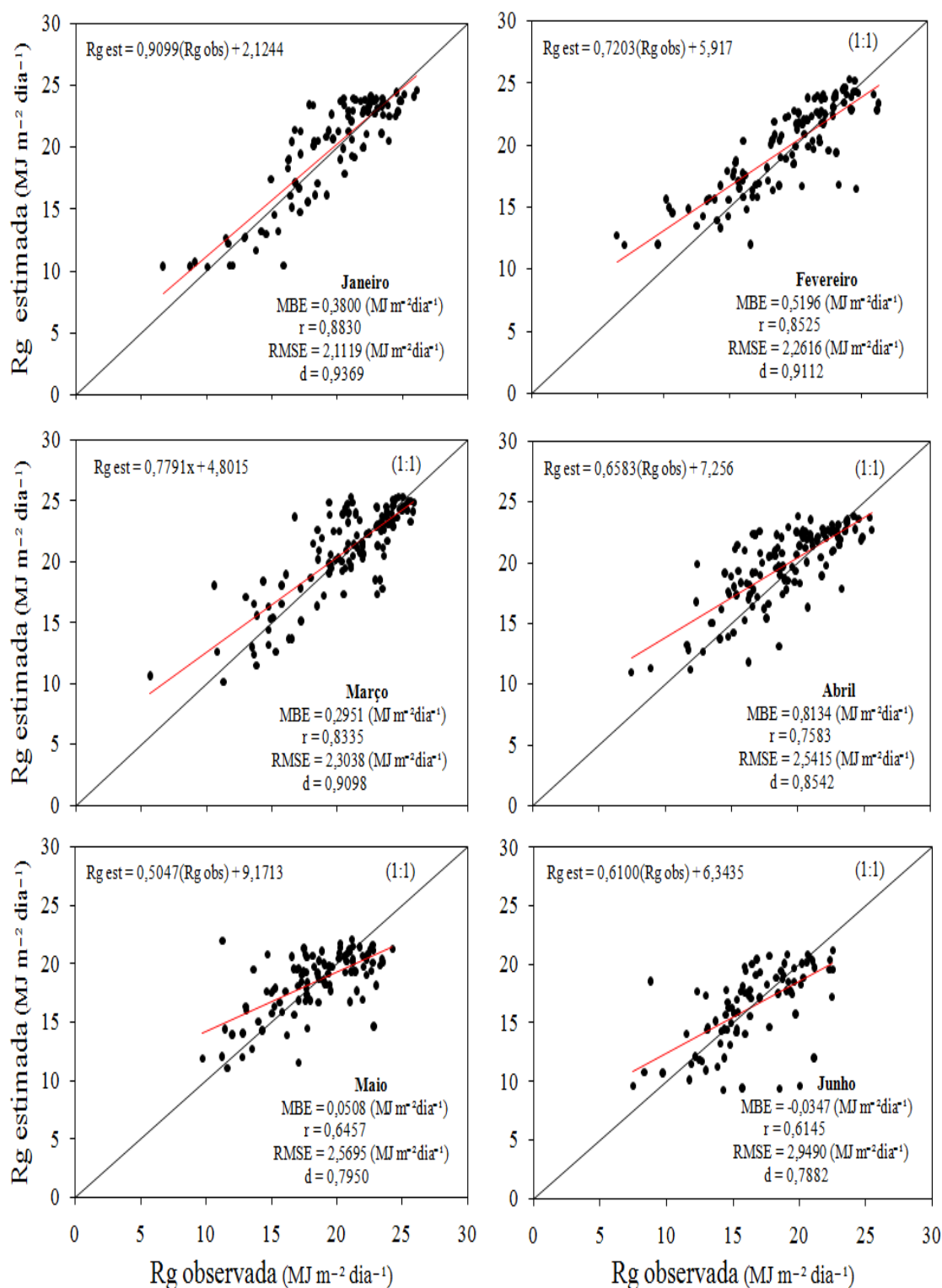


Figura 5. Relação entre a irradiância solar global (Rg) observada e estimada em MJ m⁻² dia⁻¹ e índices estatísticos MBE, “r”, RMSE e “d” dos meses de janeiro, fevereiro, março, abril, maio e junho para o modelo de Angström. A linha diagonal contínua representa a reta de 1:1.

continuação,

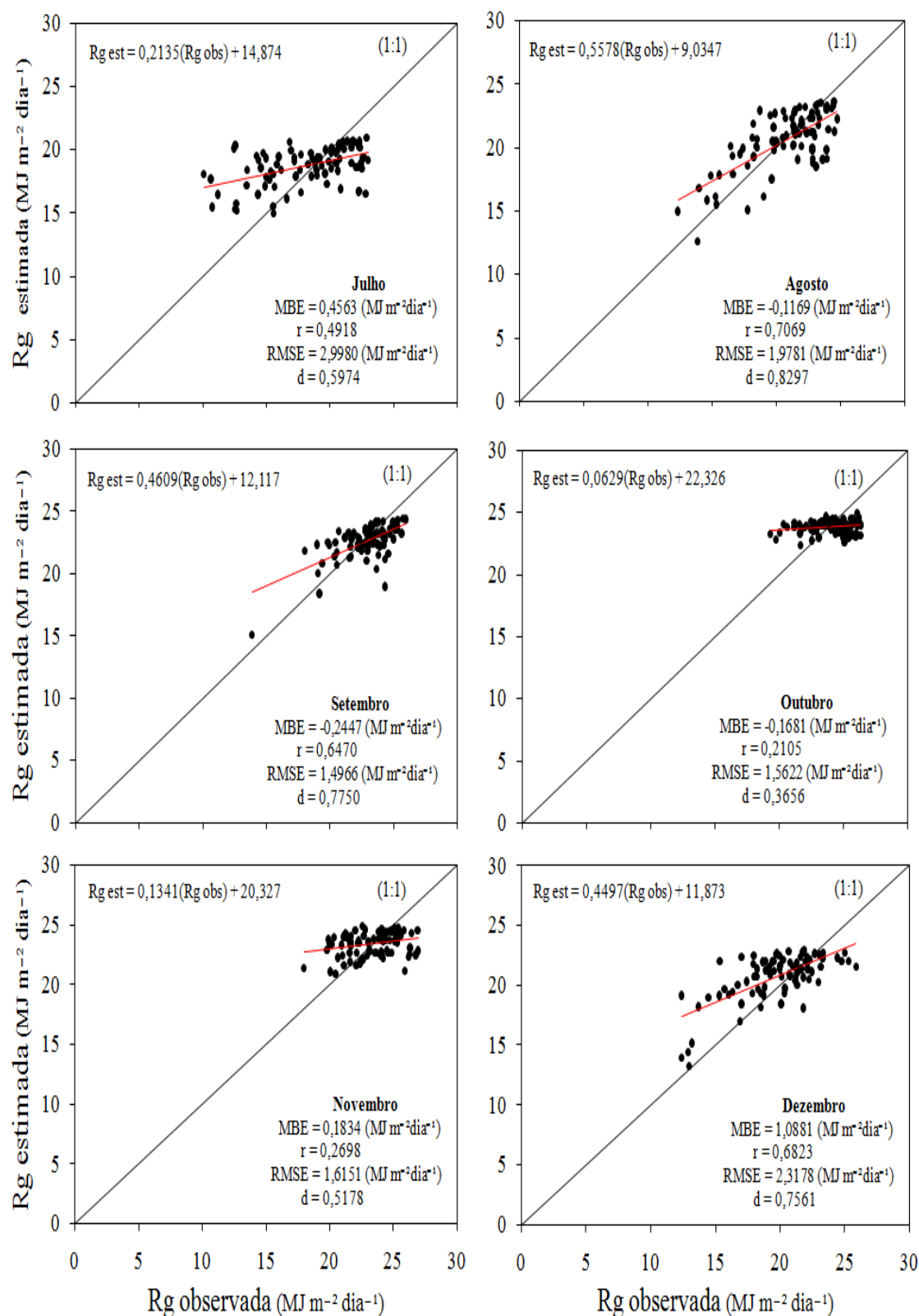


Figura 6. Relação entre a irradiância solar global (R_g) observada e estimada em $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ e índices estatísticos MBE, “r”, RMSE e “d” dos meses de julho, agosto, setembro, outubro, novembro e dezembro para o modelo de Angström. A linha diagonal contínua representa a reta de 1:1.

Modelo de Bahel

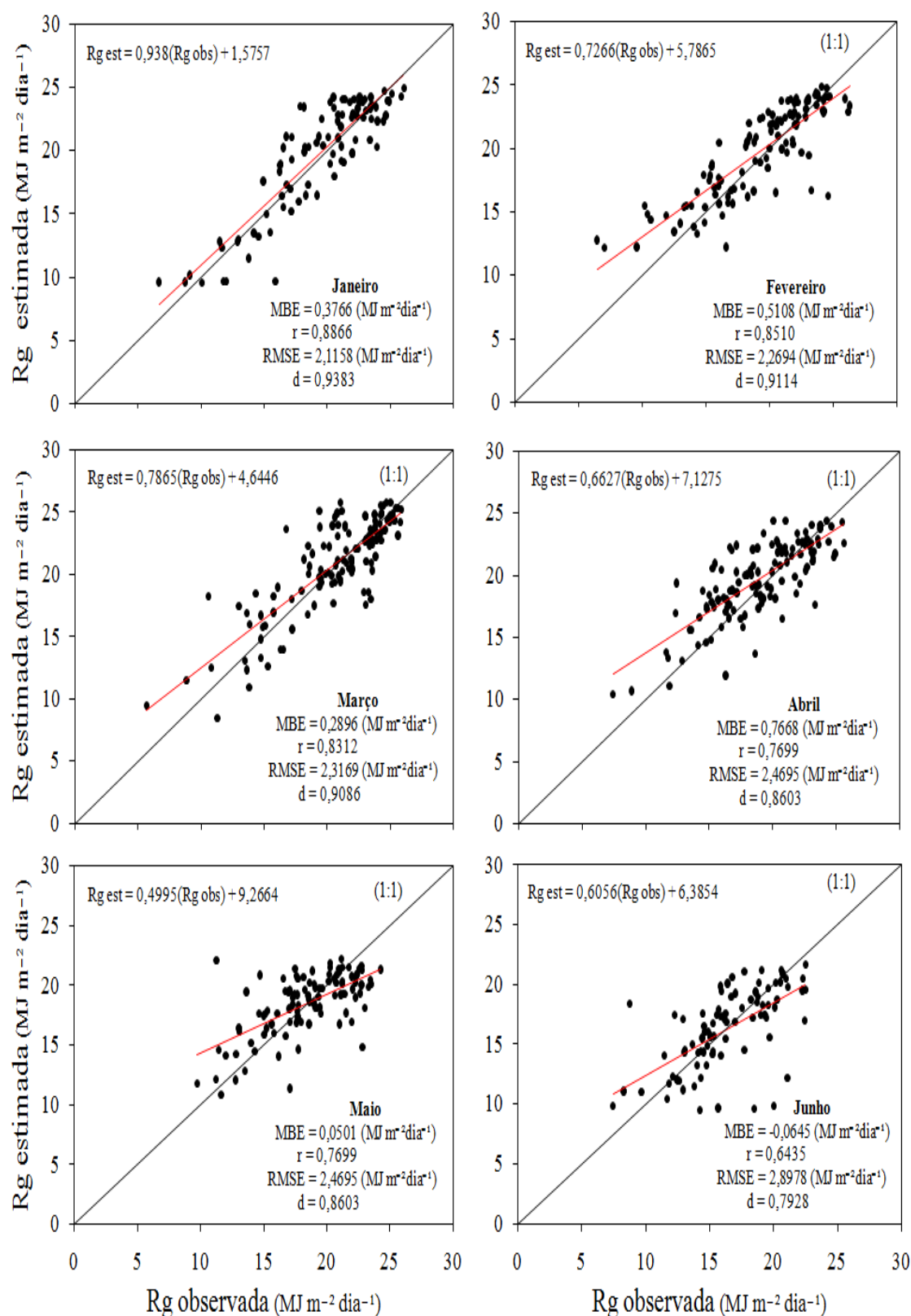


Figura 7. Relação entre a irradiância solar global (R_g) observada e estimada em $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ e índices estatísticos MBE, “ r ”, RMSE e “ d ” dos meses de janeiro, fevereiro, março, abril, maio e junho para o modelo de Bahel. A linha diagonal contínua representa a reta de 1:1.

continuação,

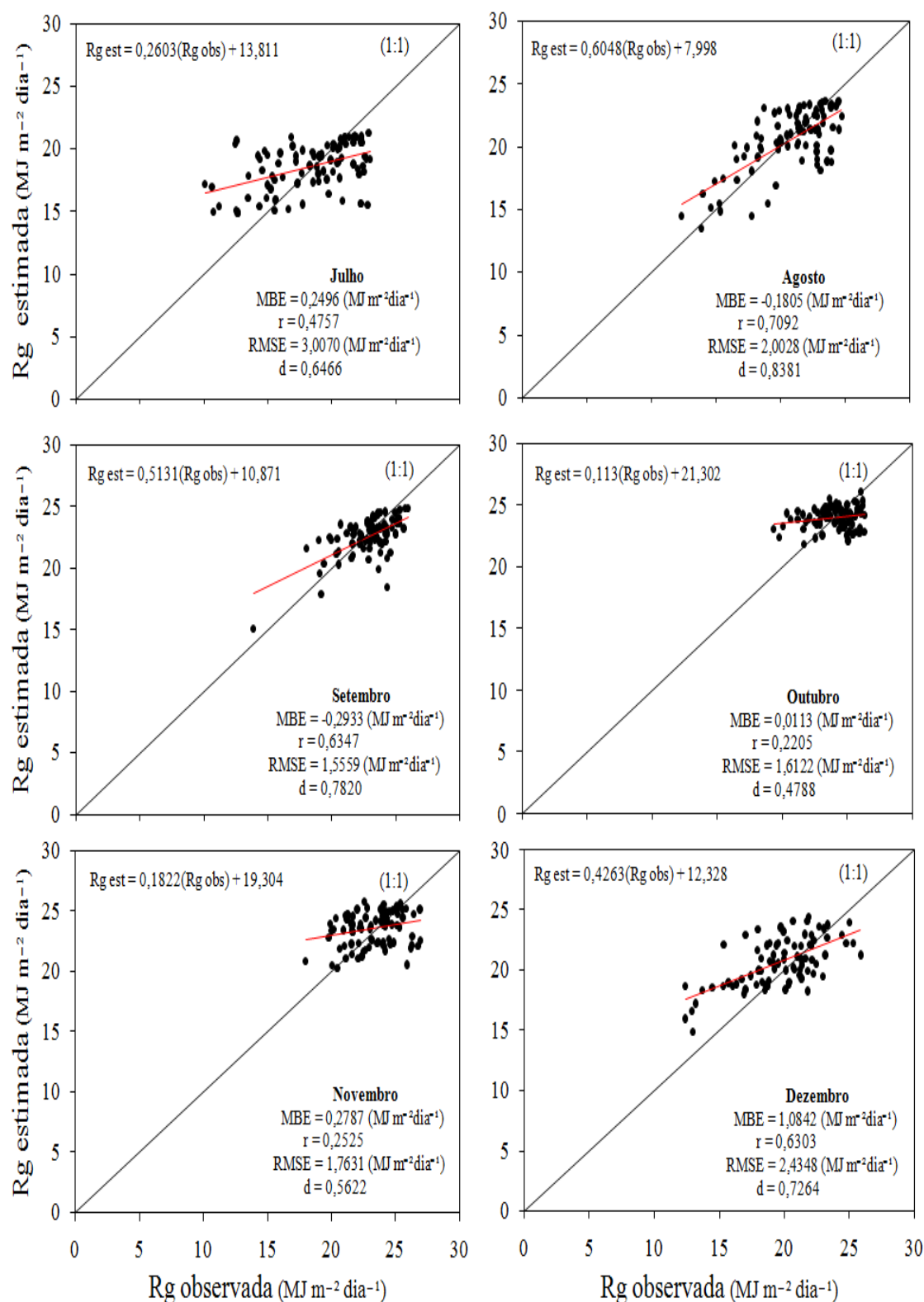


Figura 8. Relação entre a irradiância solar global (Rg) observada e estimada em MJ m⁻² dia⁻¹ e índices estatísticos MBE, “r”, RMSE e “d” dos meses de julho, agosto, setembro, outubro, novembro e dezembro para o modelo de Bahel. A linha diagonal contínua representa a reta de 1:1.

Modelo de Swartman e Ongulade

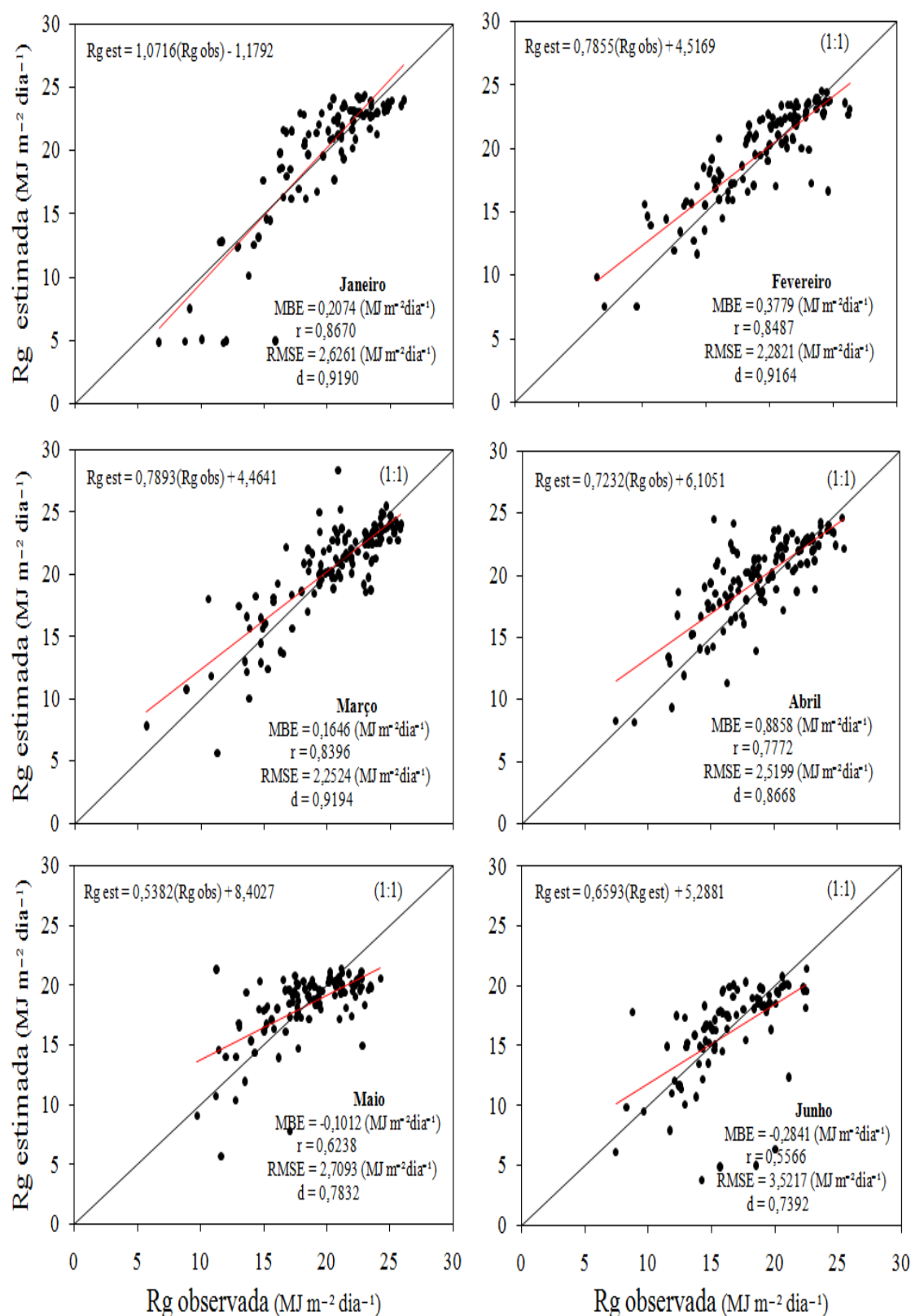


Figura 9. Relação entre a irradiância solar global (R_g) observada e estimada em $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ e índices estatísticos MBE, “r”, RMSE e “d” dos meses de janeiro, fevereiro, março, abril, maio e junho para o modelo de Swartman and Ongulade. A linha diagonal contínua representa a reta de 1:1.

continuação,

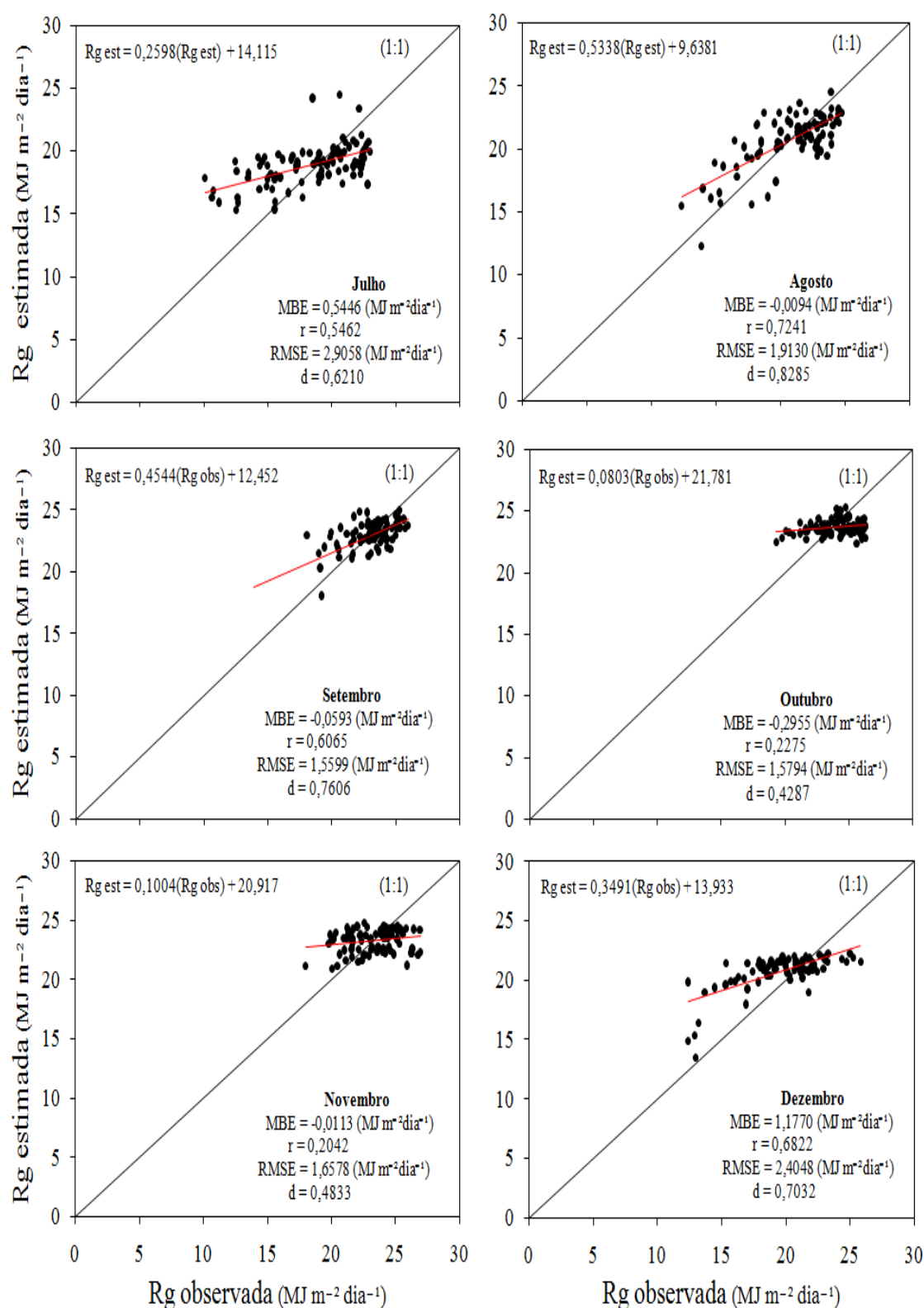


Figura 10. Relação entre a irradiância solar global (R_g) observada e estimada em $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ e índices estatísticos MBE, “r”, RMSE e “d” dos meses de julho, agosto, setembro, outubro, novembro e dezembro para o modelo de Swartman and Ongulade. A linha diagonal contínua representa a reta de 1:1.

Modelo de Ododo (a)

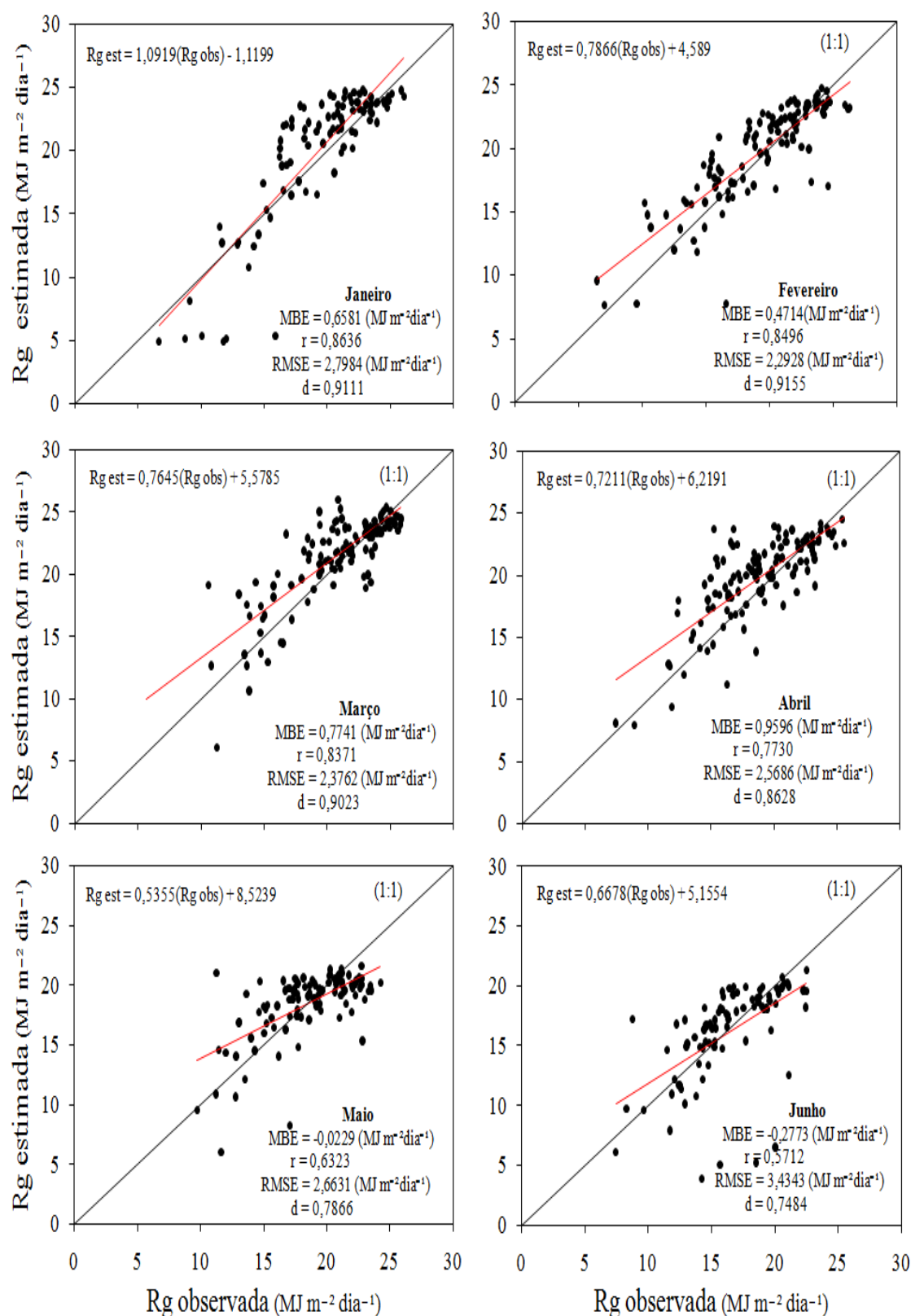


Figura 11. Relação entre a irradiância solar global (R_g) observada e estimada em $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ e índices estatísticos MBE, “r”, RMSE e “d” dos meses de janeiro, fevereiro, março, abril, maio e junho para o modelo de Ododo (a). A linha diagonal contínua representa a reta de 1:1.

continuação,

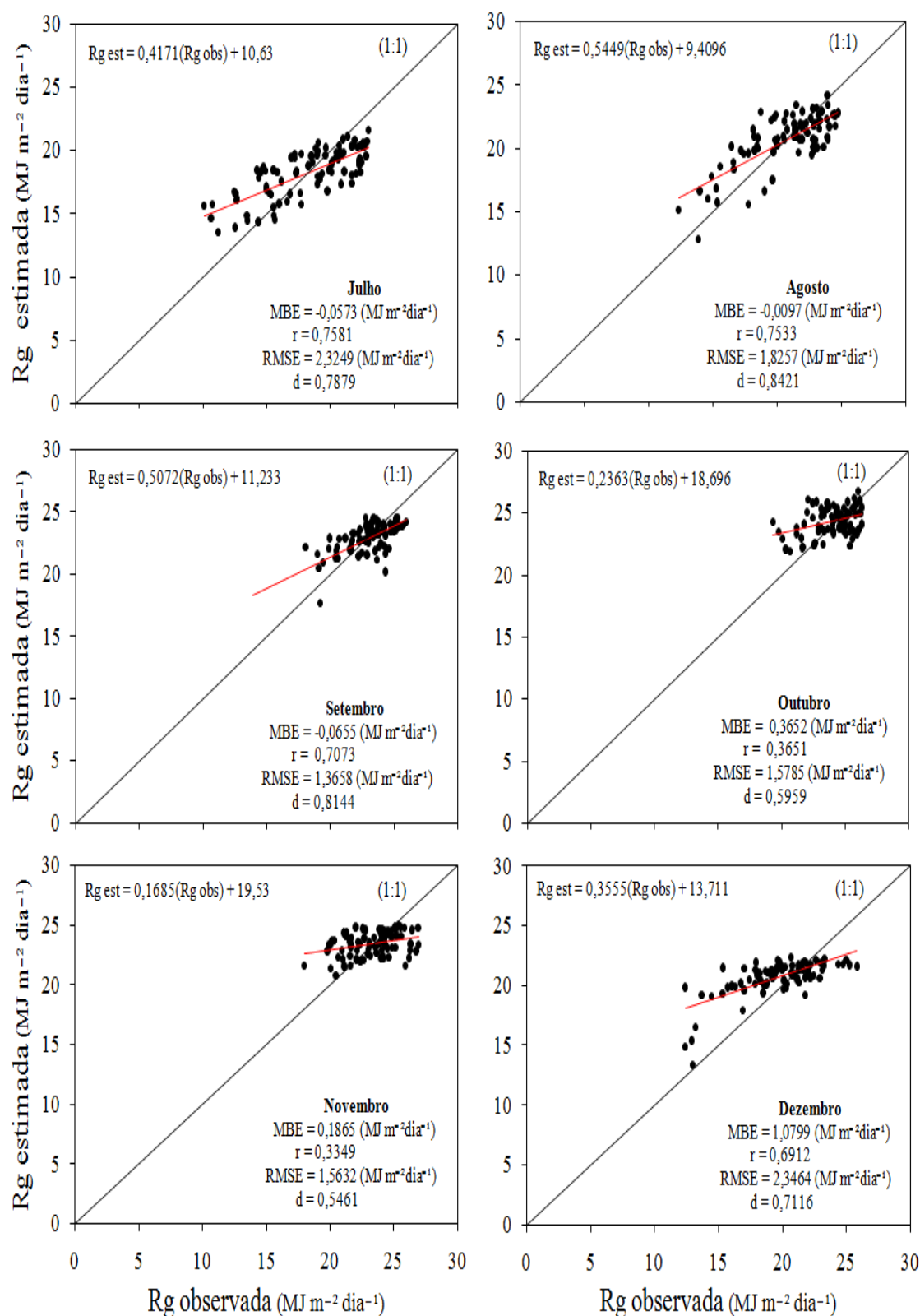


Figura 12. Relação entre a irradiância solar global (R_g) observada e estimada em $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ e índices estatísticos MBE, “r”, RMSE e “d” dos meses de julho, agosto, setembro, outubro, novembro e dezembro para o modelo de Ododo (a). A linha diagonal contínua representa a reta de 1:1.

Modelo de Ododo (b)

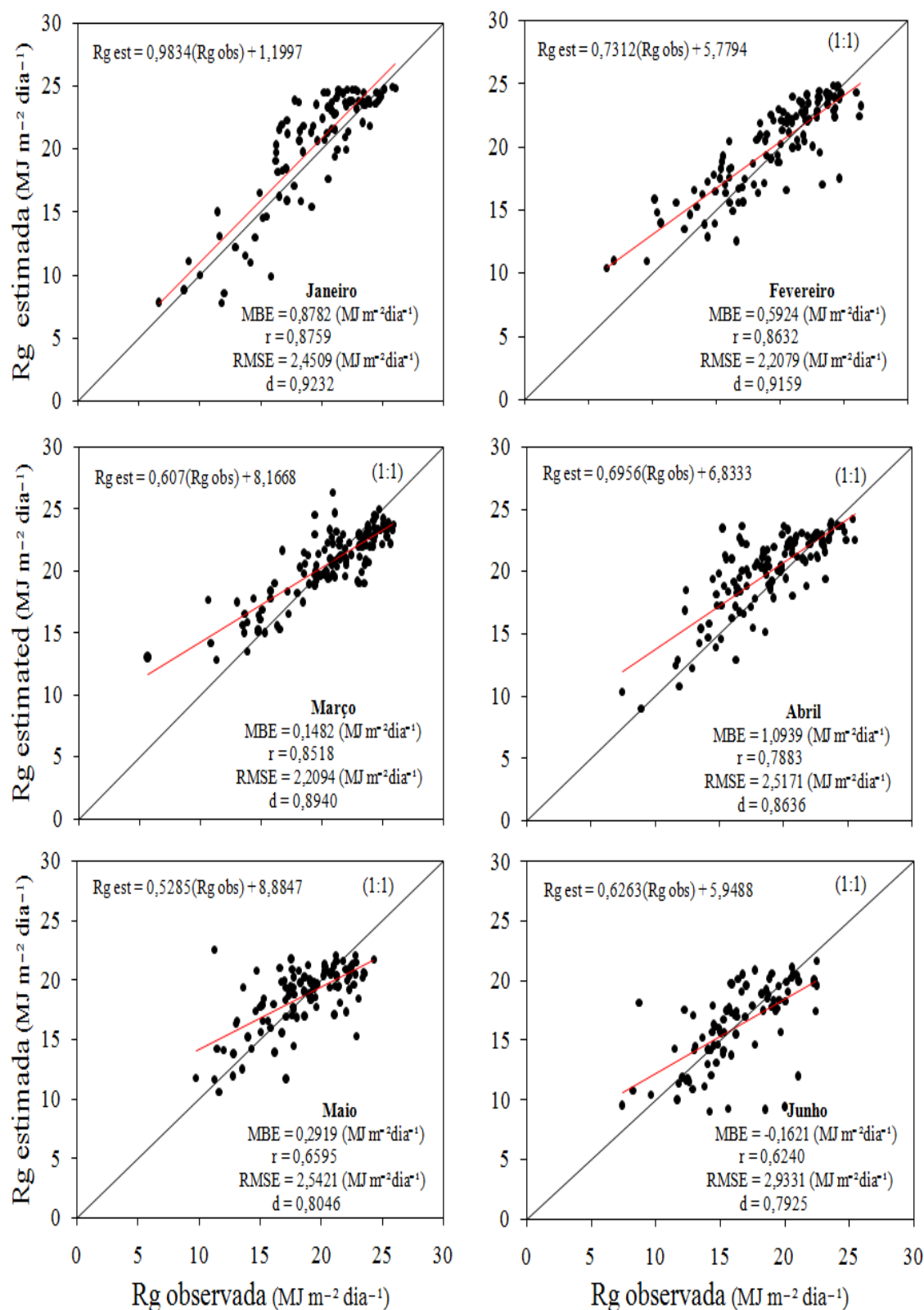


Figura 13. Relação entre a irradiância solar global (R_g) observada e estimada em $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ e índices estatísticos MBE, “ r ”, RMSE e “ d ” dos meses de janeiro, fevereiro, março, abril, maio e junho para o modelo de Ododo (b). A linha diagonal contínua representa a reta de 1:1.

continuação,

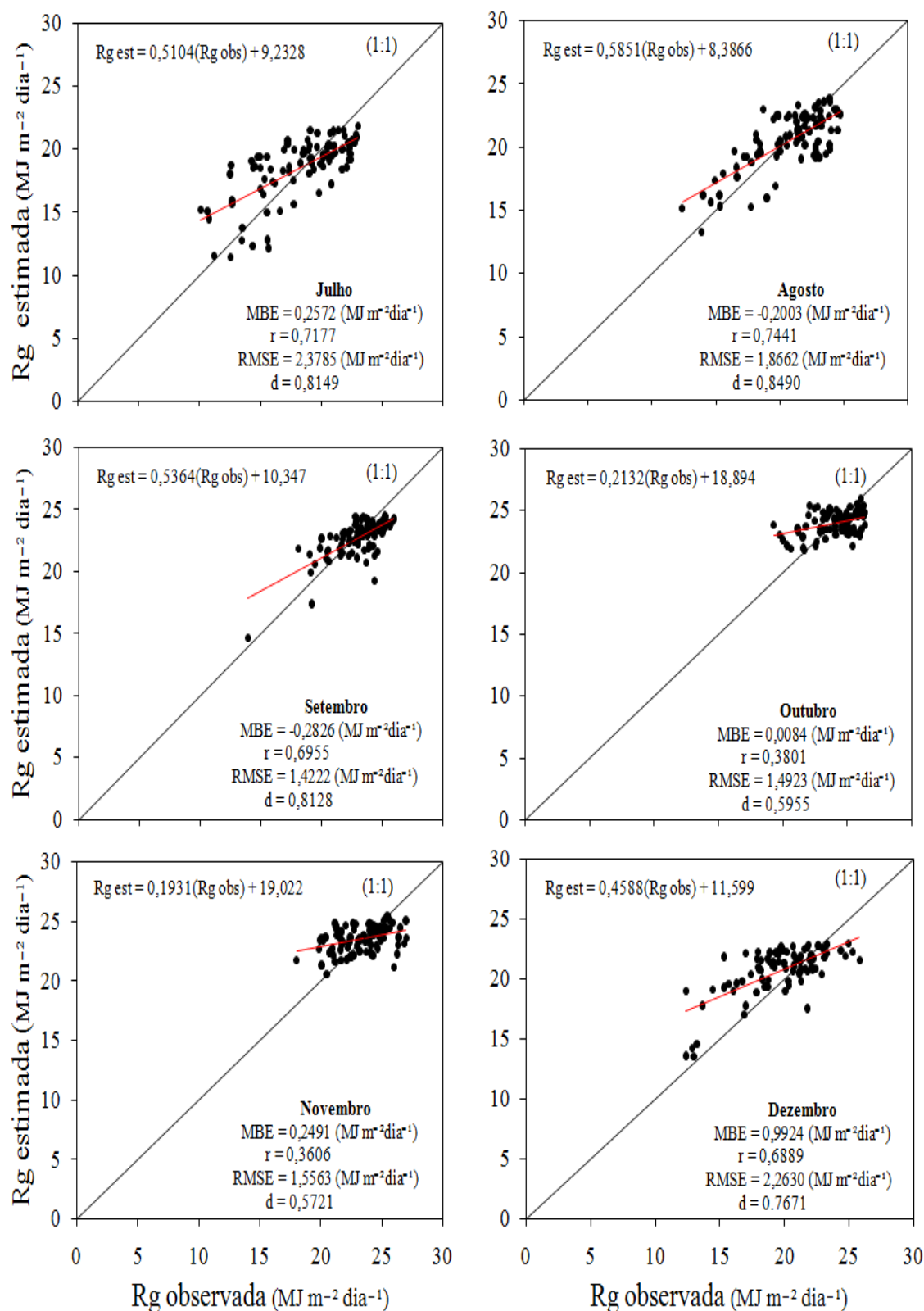


Figura 14. Relação entre a irradiância solar global (R_g) observada e estimada em $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ e índices estatísticos MBE, “r”, RMSE e “d” dos meses de julho, agosto, setembro, outubro, novembro e dezembro para o modelo de Ododo (b). A linha diagonal contínua representa a reta de 1:1.

Modelo de Chen (a)

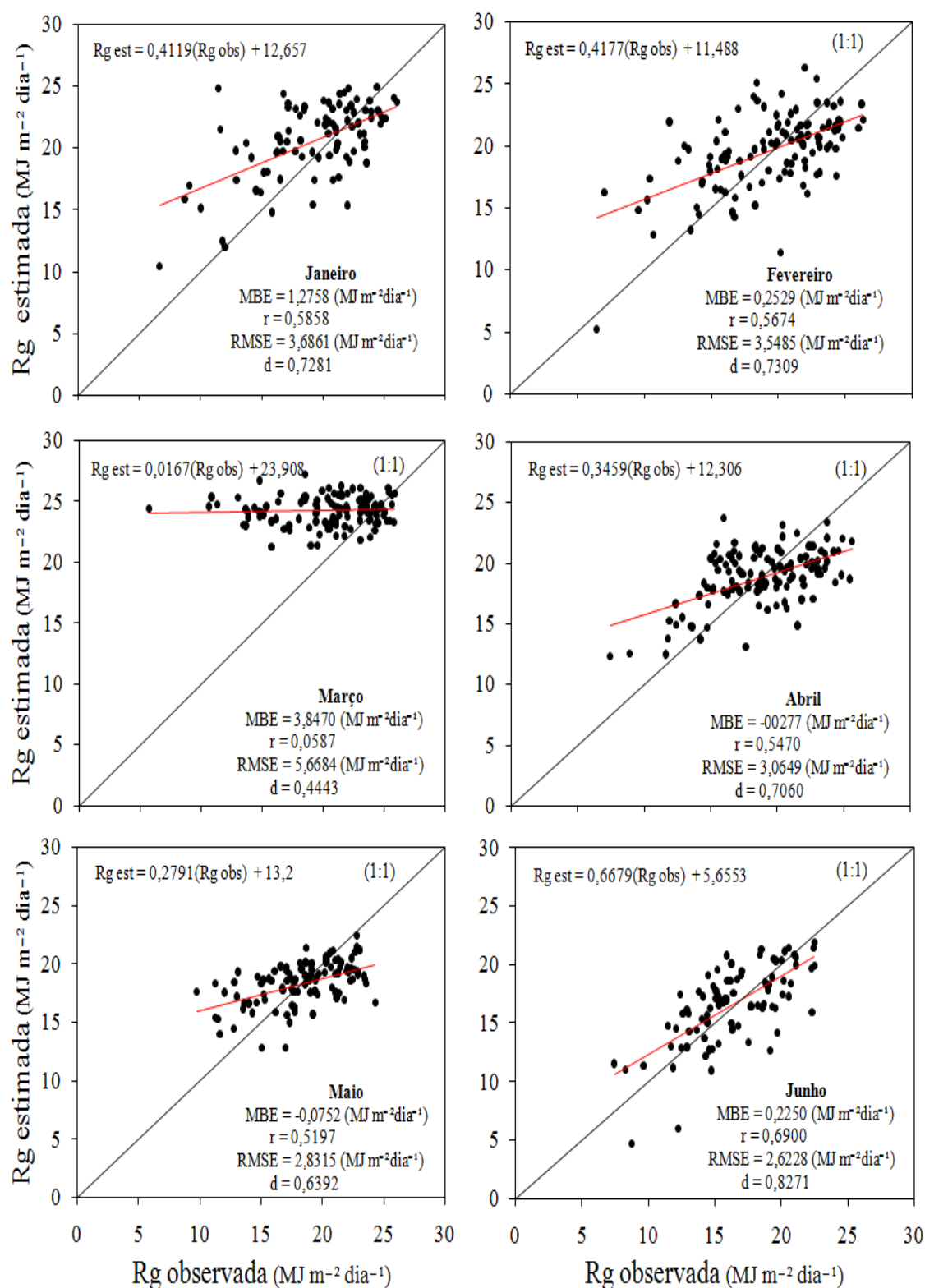


Figura 15. Relação entre a irradiância solar global (R_g) observada e estimada em $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ e índices estatísticos MBE, “ r ”, RMSE e “ d ” dos meses de janeiro, fevereiro, março, abril, maio e junho para o modelo de Chen (a). A linha diagonal contínua representa a reta de 1:1.

continuação,

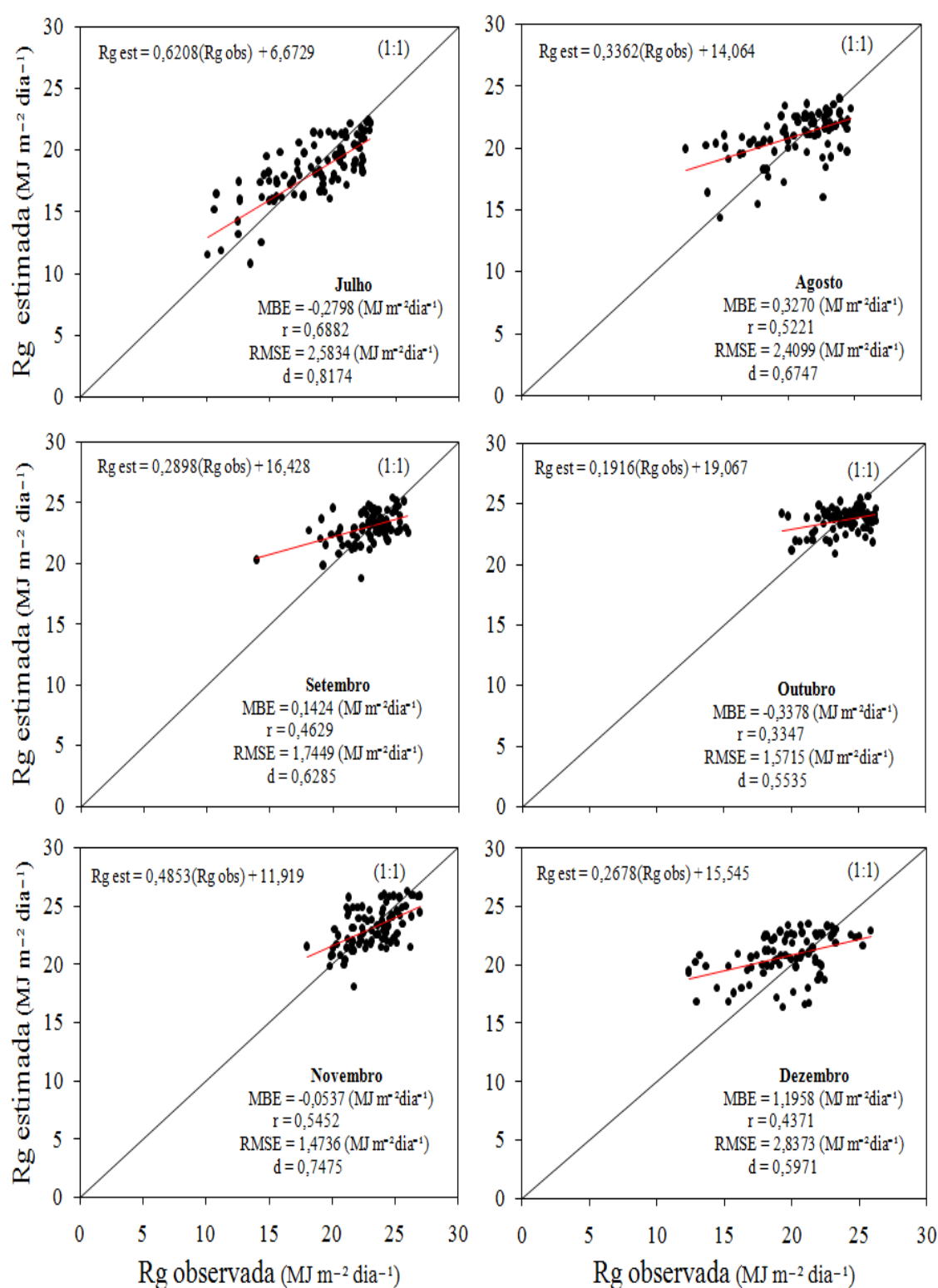


Figura 16. Relação entre a irradiância solar global (R_g) observada e estimada em $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ e índices estatísticos MBE, “r”, RMSE e “d” dos meses de julho, agosto, setembro, outubro, novembro e dezembro para o modelo de Chen (a). A linha diagonal contínua representa a reta de 1:1.

Modelo de Chen (b)

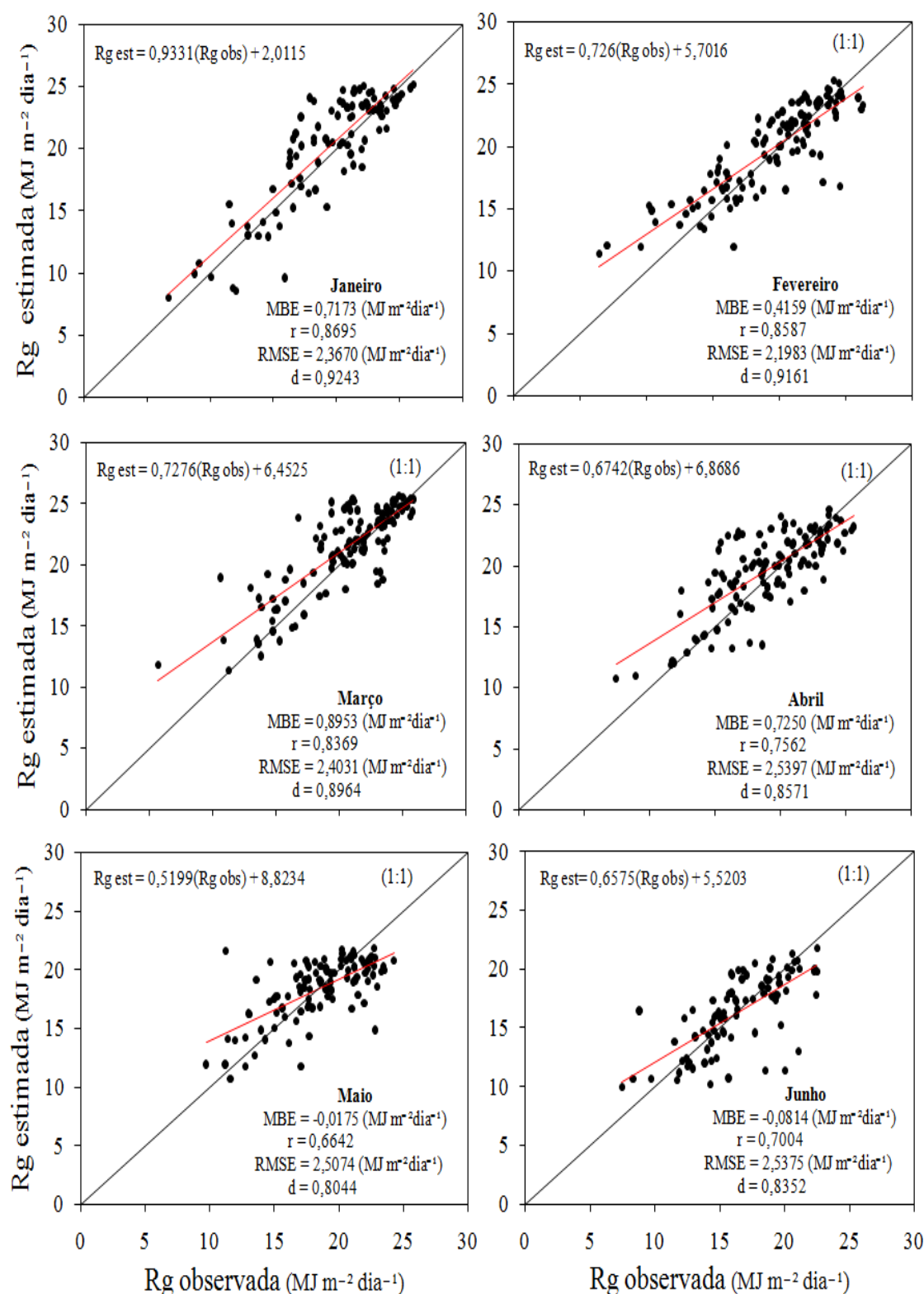


Figura 17. Relação entre a irradiância solar global (R_g) observada e estimada em $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ e índices estatísticos MBE, “r”, RMSE e “d” dos meses de janeiro, fevereiro, março, abril, maio e junho para o modelo de Chen (b). A linha diagonal contínua representa a reta de 1:1.

continuação,

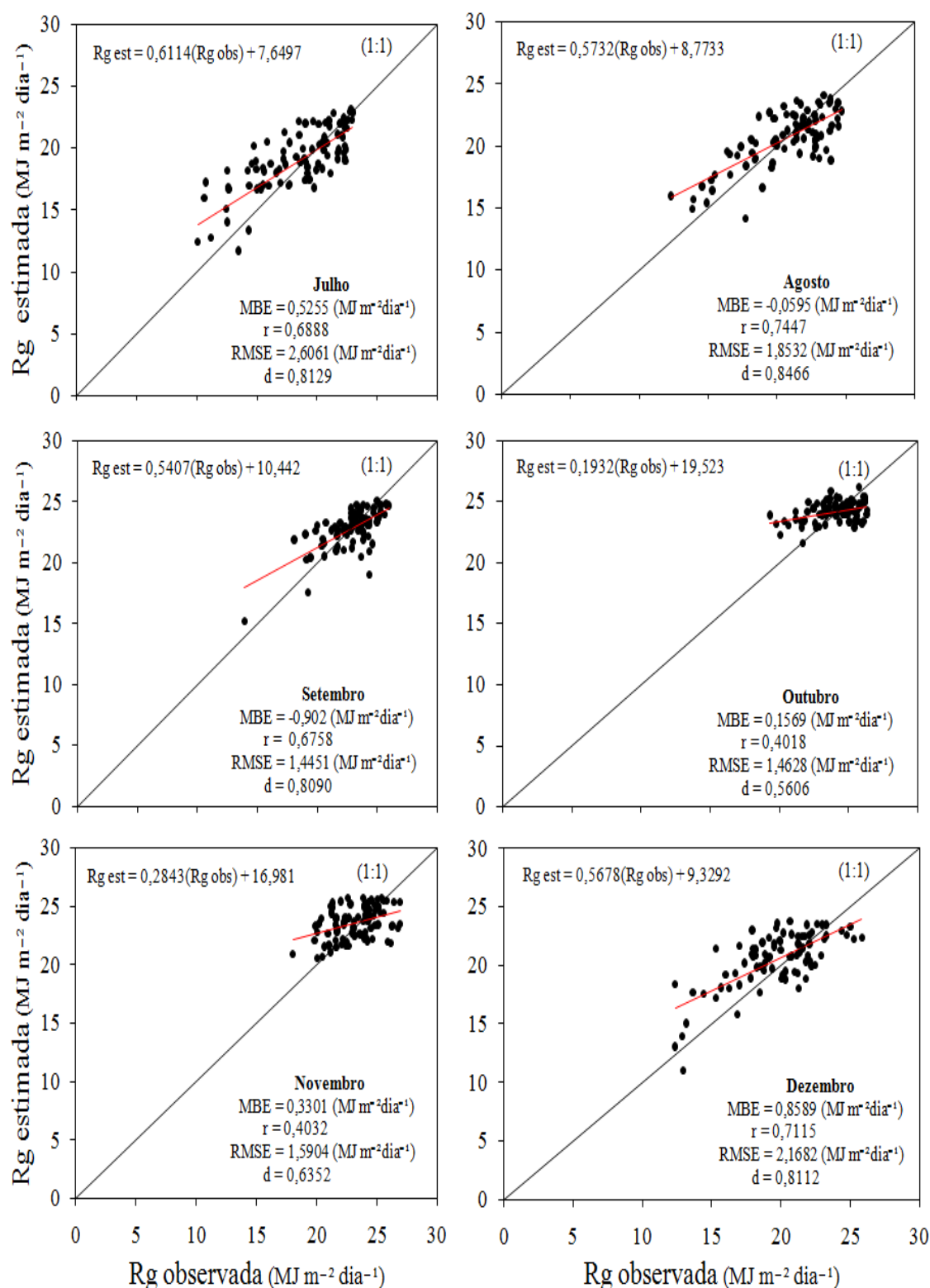


Figura 18. Relação entre a irradiância solar global (R_g) observada e estimada em $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ e índices estatísticos MBE, “r”, RMSE e “d” dos meses de julho, agosto, setembro, outubro, novembro e dezembro para o modelo de Chen (b). A linha diagonal contínua representa a reta de 1:1.

Modelo Multiplicativo

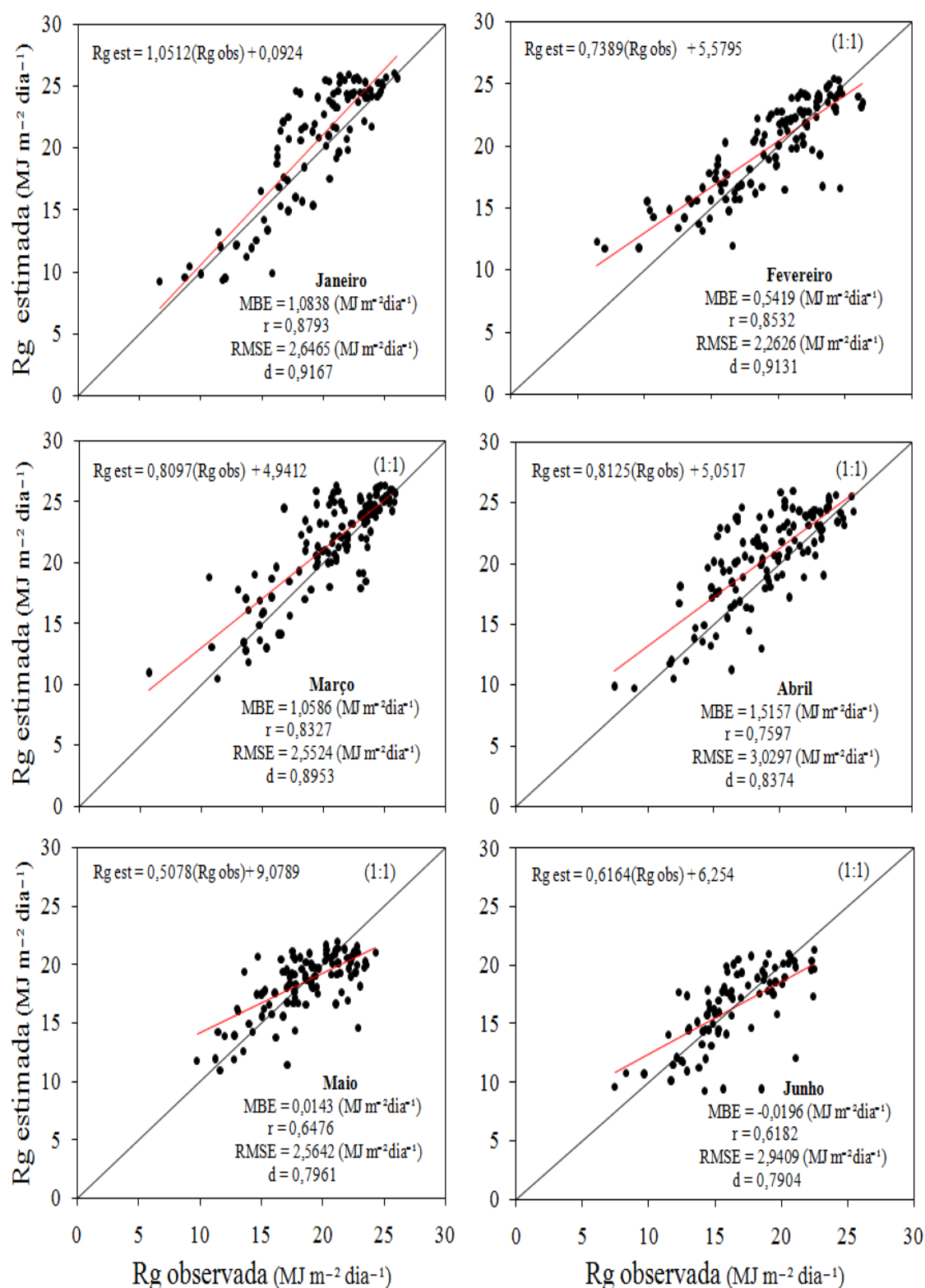


Figura 19. Relação entre a irradiância solar global (R_g) observada e estimada em $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ e índices estatísticos MBE, “ r ”, RMSE e “ d ” dos meses de janeiro, fevereiro, março, abril, maio e junho para o modelo Multiplicativo. A linha diagonal contínua representa a reta de 1:1.

continuação,

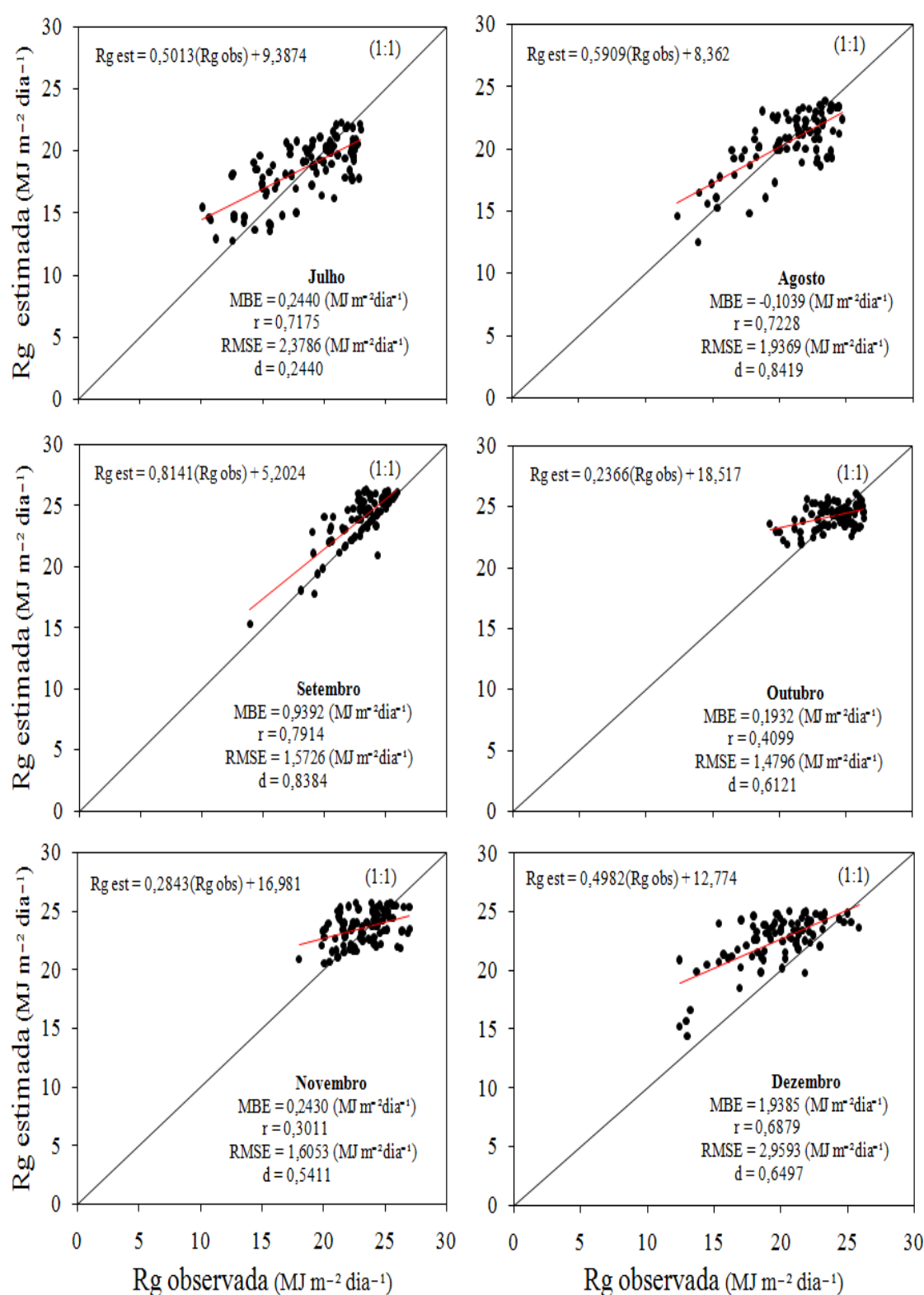


Figura 20. Relação entre a irradiância solar global (R_g) observada e estimada em $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ e índices estatísticos MBE, “r”, RMSE e “d” dos meses de julho, agosto, setembro, outubro, novembro e dezembro para o modelo Multiplicativo. A linha diagonal contínua representa a reta de 1:1.