Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>

Métodos baseados em temperatura do ar para estimativa de radiação solar incidente diária no Estado do Rio de Janeiro

Desirre Santos Mazzarella¹, Henderson Silva Wanderley², José Francisco de Oliveira Júnior³, Givanildo Gois⁴ e Gustavo Bastos Lyra²

¹Discente do curso de Engenharia Florestal, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Brasil, Rodovia BR 465, Km 07, s/n Zona Rural, Seropédica - RJ, 23890-000. ²Departamento de Ciências Ambientais, Instituto de Floresta, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Brasil. henderson@ufrrj.br (autor correspondente). ³Instituto de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Alagoas, Brasil. Av. Lourival Melo Mota, S/N. Tabuleiro dos Martins, Maceió - AL, 57072-900. ⁴Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda, Universidade Federal Fluminense, Brasil. Av. dos Trabalhadores, 420 - Vila Santa Cecília, Volta Redonda - RJ, 27255-125.

Artigo recebido em 24/05/2019 e aceito em 24/01/2020

RESUMO

A radiação solar global (R_s) é um parâmetro de entrada necessária para estimativa da evapotranspiração e em modelos de crescimento, desenvolvimento e simulação do rendimento das culturas. Em locais com ausência de dados de R_s , podem ser utilizados métodos empíricos em função dos extremos de temperatura do ar para sua estimativa. No estado do Rio de Janeiro, estudos sobre R_s com base em métodos empíricos são escassos. Portanto, o objetivo foi estimar R_s diária com base no método de Hargreaves-Samani (HS) por meio de dados da amplitude térmica diária de 11 estações meteorológicas automáticas na escala bianual (2013-2014). O desempenho do método HS com o coeficiente proposto por Hargreaves (1994) e calibrado por Allen (1995) foi avaliado com indicadores estatísticos. O coeficiente R^2 variou entre 0,30 a 0,85, seguido do índice d entre 0,58 a 0,95 e do índice c entre 0,32 a 0,87, classificados como "Péssimo" a "Ótimo". O erro absoluto variou de -6,23 a 7,09 MJ m⁻² d⁻¹ e o RQME 2,98 entre 8,69 MJ m⁻² d⁻¹. Baseado nos resultados o coeficiente proposto por Hargreaves (1994) resulta em estimativas precisas em comparação ao calibrado por Allen (1995), com ressalva das estações costeiras.

Palavras-chave: parâmetros meteorológicos, transmissividade atmosférica, amplitude térmica.

Methods based on air temperature to estimate daily incident solar radiation in Rio de Janeiro State

ABSTRACT

Global solar radiation (R_s) is a necessary input parameter for estimating evapotranspiration and in crop growth, development and simulation models. In places with no data of R_s , empirical methods may be used as a function of the extremes of air temperature for their estimation. In the state of Rio de Janeiro, studies on R_s based on empirical methods are scarce. Therefore, the objective was to estimate daily R_s based on the Hargreaves-Samani (HS) method using data from the daily thermal amplitude of 11 automatic meteorological stations on a biannual scale (2013-2014). The performance of the HS method with the coefficient proposed by Hargreaves (1994) and calibrated by Allen (1995) was evaluated with statistical indicators. The R^2 coefficient ranged from 0.3 to 0.85, followed by the d index between 0.58 to 0.95 and the c index between 0.32 to 0.87, classified as "Poor" to "Great." The médium erro ranged from -6.23 to 7.09 MJ m⁻² d⁻¹ and RMSE 2.98 to 8.69 MJ m⁻² d⁻¹. Based on the results, the coefficient proposed by Hargreaves (1994) results in more accurate estimates compared to the one calibrated by Allen (1995), with the exception of the coastal stations.

Keywords: meteorological parameters, atmospheric transmissivity, thermal amplitude.

Introdução

A radiação solar é fundamental em diversos processos físico-químicos e biológicos no planeta Terra. Ela é a variável primordial para estudos meteorológicos, climatológicos e

agrometeorológicos, com por exemplo, manejo da irrigação, calendário agrícola e estudos sobre viabilidade econômica solar, mudanças climáticas,

entre outros (Samani, 2000; Borges et al., 2010; Almorox et al., 2013; Li et al., 2014).

À falta de dados de radiação solar, fez com que vários modelos empíricos fossem desenvolvidos ao longo de décadas, baseado em dados meteorológicos de fácil acesso medido em estações meteorológicas automáticas (EMA) – (Gois et al., 2016) ou convencionais (EMC) – (Lyra et al., 2016), tais como: temperatura do ar, número de horas de brilho solar, precipitação, pressão atmosférica, entre outros; para estimar radiação solar.

Dentre os diversos métodos empíricos, que estimam a radiação solar incidente (R_s) em função da amplitude térmica, destacam-se: Hargreaves-Samani – (HS) (1982), Wahab- (CD) (1985), Thornton-Running (TR) - (1999), Donatelli and Bellocchi - (DB) (2001) e Weiss et al. - (WS) (2001). Destes métodos, o método HS é indicado pela FAO (Food and Agriculture Organization) para a estimativa de R_s quando não há valores medidos dessa variável (Allen et al., 1998). Segundo Grillone et al. (2012), o método HS apresenta maior facilidade de implementação em comparação aos métodos citados anteriormente, pois só depende apenas da amplitude térmica (temperatura do ar máxima – mínima) e da radiação solar extraterrestre (R_a). Hargreaves-Samani (1982) foram pioneiros ao introduzir a amplitude térmica como principal variável de entrada, sendo amplamente difundido pelo mundo.

Atualmente, existem diversos estudos na literatura que realizam as estimativas de R_s , que por sua vez, têm sido aplicados em diferentes locais no Brasil, por exemplo, Cruz das Almas, na Bahia - BA (Borges et al., 2010); Jaguaruana, no Ceará - CE (Nogueira et al., 2012); Minas Gerais (Da Silva et al., 2012); Alagoas (Lyra et al., 2016); Seropédica, no Rio de Janeiro - RJ (Carvalho et al., 2011; Gois et al., 2016).

A utilização desse método necessita que seja realizada a calibração de seus coeficientes empíricos (K_r), com destaque para as pesquisas que avaliaram sua calibração e precisão para locais como os Estados Unidos e Europa (Hargreaves, 1994); nos Estados Unidos (Samani, 2000); na Índia (Bandyopadhyay et al., 2008); na Itália (Grillone et al., 2012); na Argentina (Almorox et al., 2013); no Canadá (Aladenola et al., 2014); na China (Chen et al., 2004; Li et al., 2014); na Nigéria (Okundamiya et al., 2016); no México (Quej et al., 2016); no Irã (Jahani et al., 2017).

No entanto, o estado do Rio de Janeiro (ERJ) é carente de estudos sobre radiação solar, as exceções são estudos locais realizados por Carvalho et al. (2011) e Gois et al. (2016) para o município de Seropédica e a Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ), respectivamente. Porém, para todo o ERJ, os estudos são escassos com a utilização dos métodos empíricos. Portanto, o objetivo desse estudo foi avaliar a estimativa da radiação solar incidente diária baseada no método de Hargreaves e Samani com os coeficientes propostos por Hargreaves (1994) e coeficiente calibrado Allen (1995, 1997) para o estado do Rio de Janeiro.

Material e métodos

Área de Estudo

O ERJ localiza-se na região Sudeste do Brasil e possui altitude máxima de até 2.787 m (Figura 1). A área do estado é de 43.780,157 km², que corresponde a cerca de 0,51% do território do nacional. O Estado faz fronteira ao Norte (N) e Noroeste (NW) com Minas Gerais, a Sudoeste (SW) com São Paulo, ao Leste (E) e Sul (S) com o Oceano Atlântico e a Nordeste (NE) com o Espírito Santo (IBGE, 2018).

2.2 Dados Meteorológicos

A série temporal é composta por dois anos (2013 a 2014) de dados diários de temperatura do ponto de orvalho (t_d , °C), temperatura do ar máxima (t_x , °C) e mínima (t_n , °C) e radiação solar incidente (R_g , kW/h m²). A escolha desse período foi em função da disponibilidade de dados em período comum para todas as estações. Os dados meteorológicos foram fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) de 11 EMA's no ERJ, conforme a Tabela 1.

A partir dos dados meteorológicos, na escala horária, estabeleceu-se uma triagem, a fim de verificar a integridade e falhas na série temporal com intuito do aprimoramento da qualidade dos índices estatísticos, com apenas restrição de valores, valores não condizentes de t_x , t_n e t_d , ou amplitude térmica igual à zero, segundo a proposta de Borges et al. (2010). Após a realização da triagem, foram obtidos o valor de t_x diário, valor de t_n , o acumulado total diário de R_s e média diária de t_d .

Figura 1. Estado do Rio de Janeiro com a localização das 11 estações (ID) meteorológicas automáticas utilizadas no estudo.

Tabela 1. Informações das estações utilizadas neste estudo (ID – identificador, latitude, longitude (°, S, W), altitude (m), Erro relativo (%) e classificação clima Köppen)

ID	EMA	LAT (°, S)	LON (°, W)	ALT (M)	ERRO RELATIVO (%)	CLASSIFICAÇÃO CLIMA KÖPPEN
1	Arraial do Cabo	22,97	42,00	3	5,47	“Aw”
2	Cambuci	21,57	41,95	60	28,63	“Aw”
3	Ecologia Agrícola	22,80	43,68	35	10,50	“Aw”
4	Forte de Copacabana	22,98	43,18	26	9,18	“Am”
5	Nova Friburgo	22,33	42,67	1065	6,57	“Cwb”
6	Pico do Couto	22,45	43,28	1758	8,63	“Cfb”
7	São Tomé	22,03	41,05	7	8,08	“Aw”
8	Teresópolis	22,43	42,98	980	15,21	“Cfb”
9	Valença	22,35	43,70	367	20	“Cwa”
10	Vila Militar	22,85	41,05	30	9,17	“Am”
11	Xerém	22,58	43,27	24	13,97	“Af”

Legenda: Af - clima equatorial úmido; Am - clima tropical monçônico; Aw - clima tropical (chuvas no verão); Cfa - clima subtropical húmido; Cfb - clima temperado marítimo húmido; Cwa - clima subtropical/clima tropical de altitude; Cwb - clima temperado marítimo/clima tropical de altitude (Álvares et al., 2013).

Verificação da Qualidade dos Dados

Na primeira etapa de verificação dos valores de R_s , com base na proposta por Allen (1996), os dados estimados de R_s foram submetidos à uma análise prévia com objetivo de verificar e eliminar qualquer erro contínuo da série que estiver acima do limite físico indicado pela radiação solar em dia de céu claro (R_{so}), conforme Borges et al. (2010). Baseado nessa premissa, em situações de céu claro, R_s será equivalente a R_{so} (Eq. 1), sendo R_{so} um limite superior ao R_s , logo valores superiores de R_{so} foram eliminados.

$$R_{so} = (K_B + K_D) R_a \quad (1)$$

em que:

R_{so} é a radiação solar em dia claro, $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$;
 K_B é o coeficiente de transmissividade atmosférica para radiação direta, adimensional;
 K_D é o coeficiente de transmissividade atmosférica para radiação difusa, adimensional;
 R_a é a radiação global no topo da atmosfera, $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$.

Para a obtenção do valor de K_B , seguiu a metodologia proposta por Allen (1996):

$$K_B = 0,98 \exp \left[\frac{-0,00146P}{K_{tb} \sin \beta} - 0,075 \left(\frac{W}{\sin \beta} \right)^{0,4} \right] \quad (2)$$

em que:

P - pressão atmosférica estimada com base na altitude do local, kPa;
 K_{tb} - coeficiente de turbidez atmosférica, adimensional, entre 0,5 a 1,0. $K_{tb} = 1,0$ em condições de ar limpo, enquanto o $K_{tb} = 0,5$ indica um ar extremamente turvo ou poluído. Neste trabalho aplicou-se $K_{tb} = 1,0$ em todas as estações.
 β - ângulo de elevação solar, radianos;
 W - água precipitável na atmosfera, mm.

Na Eq. (2), o cálculo de β é baseado na latitude local e época do ano, como demonstrado na Eq. (3) a seguir:

$$\sin \beta = \sin \left[0,85 + 0,3\varphi \sin \left(\frac{2\pi \text{DDA}}{365} - 1,39 \right) - 0,42\varphi^2 \right] \quad (3)$$

β - valor médio de β durante o período diurno, ponderado em função de R_a , em radianos;
 φ - latitude local, radianos;
 DDA - número de ordem do dia do ano, adimensional.

Para obter a estimativa de W , Allen (1996) propôs a Eq. (4) a seguir:

$$W = 0,14 e_a P + 2,1 \quad (4)$$

em que:

e_a - pressão atual de vapor d'água na atmosfera, kPa.

Para um dado dia, a pressão atual do vapor d'água, foi calculada pela Eq. (5) a partir da média diária dos dados horários da t_d . Assim, estabeleceu a média diária para a estimativa de e_a , dada por:

$$e_a = 0,6108 \exp \left[\frac{17,27 t_d}{237,3 + t_d} \right] \quad (5)$$

em que:

t_d - temperatura do ponto de orvalho média, °C.

Para obter o valor K_D , o coeficiente de K_B foi calculado pela Eq. (6) (Allen, 1996).

$$K_D = 0,35 - 0,36 K_B \quad (6)$$

A segunda etapa de verificação de R_s , a transmissividade atmosférica (K_T) foi obtida por meio da razão entre a R_s e da radiação incidente no topo da atmosfera (R_a), que é descrita pela integração entre o nascer e o pôr do sol dos valores da R_a na partição diária, que por sua vez, foi estimada pelo método proposto pela FAO no seu boletim de Irrigação e Drenagem nº 56 (Allen et al., 1998).

Seguindo a proposta descrita por Escobedo et al. (2009), os valores de K_t superior a 0,81 foram considerados discrepantes, sendo eliminados da série temporal, devido não ocorrer uma sequência lógica de evolução das três radiações em função da transmissividade (Escobedo et al., 2009; Souza e Escobedo, 2013). Além disso, os valores de K_t abaixo de 0,20 foram eliminados, e pode ser explicado em função dos coeficientes da equação de Angström, onde não existe nenhum dado de R_s disponível ou nenhuma calibração foi realizada, os valores como $a = 0,25$ e $b = 0,50$, sendo esses coeficientes provados fisicamente (Allen et al., 1998).

Método de Estimativa de R_s

O método proposto por Hargreaves e Samani (1982) utiliza como principal variável de entrada a amplitude térmica. Para o ajuste do método, foi elaborada uma matriz no Excel®, com os parâmetros necessários, mencionados anteriormente, além de informações sobre dia, mês,

ano, DDA, e o coeficiente calibrado (K_r) proposto por Allen (1995).

Neste estudo, utilizou-se duas sugestões para o K_r ao estimar R_s no método Hargreaves e Samani. Seguindo a proposta sugerida por Hargreaves (1994), o K_r igual a 0,16 (região interior, denominado de HSINT) e 0,19 (região litorânea, denominado de HSCOS). Define região interior quando está numa distância acima de 20 km do oceano (Lyra et al., 2016). E a segunda proposta foi a calibração do K_r (denominado de HSKR), sugerido por Allen (1995).

Hargreaves e Samani (1982) foram precursores ao introduzir a variável temperatura do ar para estimativa da R_s , mostrada na Eq. 7:

$$R_s = K_r(t_x - t_n)^{0,5} R_a \quad (7)$$

em que:

K_r - coeficiente de calibração, número adimensional;

t_x - temperatura do ar máxima, em °C;

t_n - temperatura do ar mínima, em °C;

R_a - radiação global no topo da atmosfera, MJ m⁻² d⁻¹.

O cálculo de K_r proposto por Allen (1995) calibra o K_r para microclima local de cada estação no estudo. Existem dois cálculos de K_r , conforme as Eqs (8) e (9) a seguir.

Para região costeira:

$$K_r = 0,20 \left(\frac{P}{P_o}\right)^{0,5} \quad (8)$$

Para região interior:

$$K_r = 0,17 \left(\frac{P}{P_o}\right)^{0,5} \quad (9)$$

em que:

P - média mensal da pressão atmosférica do local;

P_o - média pressão atmosférica ao nível do mar (101,3 kPa).

O cálculo de P foi realizado de acordo com as características locais, segundo a metodologia proposta por Burman et al. (1987).

$$P = 101,3 \cdot \left(\frac{293 - 0,00065 \cdot z}{293}\right)^{5,26} \quad (10)$$

em que:

z - elevação acima do nível do mar, em metros.

2.5 Desempenho do Método de Estimativa de R_s

As avaliações de desempenho dos métodos de estimativa de R_s basearam nos principais indicadores estatísticos usados na literatura na comparação dos métodos de estimativa de radiação (Stone, 1993; Camargo e Sentelhas, 1997; Chen et al., 2004; Borges et al., 2010). Nesse estudo foram utilizados: i) coeficiente de determinação (R^2) (Eq. 11); ii) índice de concordância Willmott - d iii) (Eq. 12); iv) raiz do quadrado médio do erro (RQME) (Eq. 13); v) erro absoluto médio (EAM) (Eq. 14) e vi) índice de confiança (c) (Eq. 15).

$$R^2 = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})(E_i - \bar{E})}{\left[\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2\right]^{0,5} \left[\sum_{i=1}^N (E_i - \bar{E})^2\right]^{0,5}} \right\}^2 \quad (11)$$

em que:

O_i - valor observado da radiação solar diária, MJ m⁻² d⁻¹;

$\bar{O}$ - média dos valores observados da radiação solar diária, MJ m⁻² d⁻¹;

E_i - valor estimado da radiação solar diária, MJ m⁻² d⁻¹;

$\bar{E}$ - média dos valores estimados da radiação solar diária, MJ m⁻² d⁻¹.

$$d = 1,0 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - E_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|E_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)} \quad (12)$$

$$RQME = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (E_i - O_i)^2}{N}} \quad (13)$$

em que:

N é o total de termos.

$$EAM = \sum_{i=1}^n \frac{|E_i - O_i|}{n} \quad (14)$$

$$c = r \cdot d \quad (15)$$

em que:

r - coeficiente de correlação, adimensional;

d - coeficiente de Willmott, adimensional.

Na Tabela 2 é avaliado o critério de interpretação do desempenho do índice c.

Tabela 2. Critério de interpretação do desempenho dos métodos de estimativa de R_s , pelo índice c

VALOR DE C	DESEMPENHO
> 0,85	Ótimo
0,76 A 0,85	Muito Bom
0,66 A 0,75	Bom
0,61 A 0,65	Mediano
0,51 A 0,60	Sofrível
0,41 A 0,50	Mau
$\leq 0,49$	Péssimo

O coeficiente R^2 é um índice de ajustamento por regressão linear, que descreve a proporção da variância total dos dados observados pelos dados estimados entre 0 a 1, com valores próximos de 1 com melhor precisão ajustamento entre os dados observados e estimados (Legates et al., 1999). O índice de Willmott (d) define a exatidão ou concordância dos valores estimados em relação aos dados observados (Willmott, 1981). O índice d pode variar de 0 a 1, quanto mais próximo de 1 (um) representará uma concordância perfeita.

A RQME mede o erro total, onde demonstra as diferenças individuais entre os valores estimados (E_i) e os valores observados (O_i), e N é o total de termos. O EAM mensura o quanto o valor estimado está sendo subestimando (negativo) e superestimando (superestimando) os valores observados. O índice c proposto por Camargo e Sentelhas (1997), serve como indicador de desempenho, reunindo os índice de exatidão (índice de Willmott) e o índice de precisão (coeficiente de determinação).

Resultados e discussão

Ajuste do Coeficiente Empírico (K_r)

Os valores de K_r estimados pelo método proposto por Allen (1995) para regiões costeira e interior do ERJ são apresentados na Figura 2. O intervalo de K_r variou entre 0,15 (Pico do Couto) a 0,20 (Arraial do Cabo). Os valores das estações costeiras, Arraial do Cabo, Copacabana e São Tomé apresentaram valores próximos aos encontrados por Bandyopadhyay et al. (2008) nas estações costeiras da Índia com valores de K_r igual 0,20.

Resultados similares foram obtidos na literatura, por alguns autores em relação aos valores de K_r , por exemplo, Lima et al. (2006) entre 0,161 a 0,169, em MG, e Lyra et al. (2016) encontrou valores de K_r entre 0,168 a 0,231, no estado de Alagoas (AL). O coeficiente calibrado K_r apresentou padrão de distribuição espacial característico, isto é, com os maiores valores observados no litoral, seguido de diminuição significativa de K_r em direção ao interior do ERJ. Na medida em que a elevação das estações do ambiente costeiro esteja próxima ao nível médio do mar (NMM), o K_r não seria afetado, sendo que o valor do K_r estaria entre 0,19 até 0,20, segundo Hargreaves (1994) e Allen (1997).

Na Sicília-Itália, Grillone et al. (2012) demonstraram que ao separar a calibração de K_r por sazonalidade (verão e inverno), não houve variação significativa entre K_r nas respectivas estações. Lima et al. (2006) analisaram K_r nas escalas diária e mensal em Minas Gerais pelo método sugerido por Allen (1996). Os valores obtidos de erro padrão de estimativa (EPE) foram maiores na escala diária em comparação a mensal. No entanto, Lima et al. (2006) compararam os valores de EPE calculado pelo método Allen (1995) e do coeficiente fixo de Hargreaves (1994), em ambas as escalas, e não apresentaram diferença significativa de valores de EPE. Ambos os estudos, Lima et al. (2006) e Da Silva et al. (2016), sugeriram que fossem utilizados o coeficiente fixo de Hargreaves (1994), visto que há diminuição dos erros em relação ao coeficiente calibrado proposto por Allen (1995 e 2016).

Figura 2. Valores de K_r estimado de acordo com o método sugerido por Allen (1995).

Desempenho do Método de Hargreaves e Samani com coeficientes propostos por Hargreaves (1994) e coeficiente calibrado Allen (1995) para estimativa de R_s

As estações existentes na RMRJ (Tabela 1) são influenciadas pelo alto grau de urbanização, principalmente pela intensificação da Ilha de Calor Urbano (ICU), seguido da sua fisiografia, como por exemplo, a presença de maciços costeiros, lagoas e as baías de Sepetiba e Guanabara (Moraes et al., 2005; Zeri et al., 2011; Oliveira Júnior et al., 2015; Wanderley et al., 2019). Além disso, a RMRJ juntamente com as Regiões Baixadas Litorâneas, Norte e Noroeste apresentam t_x médias maiores (Silva et al., 2014; Delgado et al., 2017) e, portanto influenciaram nas estimativas da R_s devido à grande amplitude térmica encontrada nessas regiões.

Na cidade do Rio de Janeiro (CRJ), os Maciços da Tijuca, Gericinó-Mendanha ao norte (N) e da Pedra Branca à oeste (W), contribuem para alta variabilidade da chuva (Dereczynski et al., 2009; Zeri et al., 2011), e com isso influencia diretamente na disponibilidade de R_s . Na Zona Oeste do Rio de Janeiro (ZORJ), particularmente na estação Vila Militar (ID10), apresentou maior amplitude térmica em comparação a estação Forte Copacabana (ID4) no período de estudo.

As estações Xerém (ID11), Vila Militar (ID10), Cambuci (ID2) e Ecologia Agrícola (ID3),

pertencentes a RMRJ, tiveram desempenho similares com relação ao modelo HSINT (Figura 3). No entanto, para as estações ID10 e ID4, verificou-se que a ID-4 possui similaridade com as outras estações próximas do ambiente costeiro, por exemplo, as estações de Arraial do Cabo (ID1) e São Tomé (ID7).

Isso se deve ao fato de ambas as estações serem influenciadas pela ação da maritimidade. Ela é fator importante como regulador térmico, mantendo a amplitude térmica constante o ano todo, com isso houve baixo desempenho dos modelos baseados em variação de temperatura nessas estações. A baixa predição também foi observada por Bandyopadhyay et al. (2008) em estações costeiras da Índia.

As estações ID1 e ID7 pertencem às regiões da Baixada Litorânea e Norte possuem t_x e t_n mais elevados do Estado, possuindo uma baixa amplitude térmica (Silva et al., 2014; Delgado et al., 2017). Isso se deve, ao fator latitude, além da influência do regime de ventos característicos da atuação do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), frequentes e intensos praticamente todo o ano. Ambas as regiões possuem a menor taxa pluviométrica do Estado (em média 1000 mm ano^{-1}) (Silva et al., 2014; Brito et al., 2017), com isso influencia numa maior disponibilidade de R_s .

Figura 3. Desempenho espacial do coeficiente R^2 do método Hargreaves e Samani (1982) com K_r proposto por Hargreaves (1994) e K_r calibrado Allen (1995) das 11 estações (ID) utilizadas no estudo no período de 2013-2014.

Na Figura 4 é apresentado o desempenho dos métodos adotados no estudo. Verificou-se que as estações de ID1 e ID7, os métodos HSCOS e HSKR foram similares, com erros maiores do que as demais estações avaliadas. Ao contrário, da estação ID4, com valores menores de EAM e RQME. A estação ID4 situa-se em região de

elevado adensamento urbana, seguida do ambiente costeiro e próxima dos maciços da Pedra Branca e Tijuca (Silva et al., 2014; Oliveira Júnior et al., 2015). Certamente, a maritimidade e intensificação de ICU influenciaram no aumento da precisão ao estimar R_s em relação as demais estações costeiras.

Os resultados obtidos dos índices c e d indicaram que o coeficiente proposto por Hargreaves (1994) apresentou melhor desempenho para as estações continentais, com maior variabilidade na amplitude térmica, em comparação as estações costeiras. As estações ID9, ID6, ID8 e ID5, ambas nas regiões Serrana e no Vale do Paraíba, possuem baixa amplitude térmica e maiores índices pluviométricos entre as regiões de Governo do ERJ (Silva et al., 2014; Brito et al., 2017). Nessas regiões os métodos foram menos eficientes.

Comparativamente os métodos HSINT e HSKR para as estações ID9, ID6, ID8 e ID5, o HSINT obteve melhor precisão. Samani (2000) ressaltou que ao utilizar a equação proposta por Allen (1995) em localidades que à diferença de temperatura diminui com o aumento da altitude, resulta na subestimação significativa de R_s . No entanto, ao observar os valores de EAM positivos, constatou-se que HSKR teve tendência de superestimar R_s em estações com altitude, concluindo que nessas estações não seguiu o comportamento de subestimar R_s .

As estações ID11, ID10, ID2 e ID3, possuem as maiores amplitudes térmicas do Estado e, portanto os indicadores estatísticos foram melhores. O método HSINT obteve melhor desempenho em relação ao método HSKR, com menores valores de EAM e RQME, e os melhores ajustes de R^2 e c . Da Silva et al. (2016) encontraram valores baixos de R^2 ao usar o método HSINT em nove estações no norte de MG, sendo esses inferiores a 0,60. Ainda, segundo os autores as estações de São Romão e Salinas tiveram valores altos de EAM em métodos baseados na temperatura do ar, devido à menor amplitude térmica, comportamento similar obtido pelas estações ID1 e ID7. Para Teresópolis Ramos et al. (2018) encontraram $R^2 = 0,48$.

De modo geral, as estações continentais apresentaram melhor consistência com base no método HSINT com valores dos índices d e c superiores a 0,71 e 0,64, sendo diferente do que foi encontrado por Nogueira et al. (2012) de 0,60 e 0,35 em Jaguaruana, no CE, e por Borges et al.

(2010) de 0,77 em Cruz de Almas, na BA e Ramos et al. (2018) de 0,81 para Teresópolis-RJ. Porém, para estações ID6, ID8 e ID9, onde se tem menor amplitude térmica em função da altitude, apresentaram valores 0,30 a 0,64 diferentemente dos valores encontrados por Borges et al. (2010), Nogueira et al. (2012) e Da Silva et al. (2016), respectivamente (Figura 5).

Lyra et al. (2016) em estudo da estimativa da radiação solar pelo método de Hargreaves e Samani em seis regiões fisiográficas no estado de AL, encontraram coeficiente R^2 e índice d similares às regiões costeiras, e superiores as estações continentais. Contudo, no estudo de Lyra et al. (2016) notou-se o mesmo comportamento de K_r calibrado e K_r proposto neste trabalho, melhores resultados da análise estatística para as estações costeiras com HSKR, e para as regiões de interior, com HSINT. O mesmo comportamento foi observado por Lima et al. (2006) e Bandyopadhyay et al. (2008), que obtiveram resultados similares em relação as estações continentais com superestimar R_s .

A calibração proposta por Allen (1995) obteve resultados satisfatórios para as estações continentais no ERJ, situação contrária reportada por Allen (1997), o qual havia mencionado, que especialmente em regiões áridas e elevadas, a calibração de K_r teria valores mais precisos de R_s em comparação a os valores K_r proposto por Hargreaves (1994). Allen (1997) enfatizou que o K_r calibrado não seria preciso em estimativas diárias de R_s quanto mensais, porém Bandyopadhyay et al. (2008) encontrou resultados não significativos tanto diários, quanto mensais em estações na Índia.

Os indicadores estatísticos utilizados neste estudo, podem estar sendo influenciados por fatores destacados por Allen (1997), que por sua vez podem influenciar na estimativa de R_s , por exemplo, a nebulosidade, a velocidade do vento, o conteúdo de vapor d'água, evapotranspiração, a altitude, a chuva, passagem de sistemas frontais (SF) e aerossóis. Com isso afeta diretamente t_x e t_n , especialmente em escala diária.

Figura 4. Indicadores estatísticos (índices d, c, RQME e EAM) do método Hargreaves e Samani (1982) com K_r proposto por Hargreaves (1994) e K_r calibrado Allen (1995) das 11 estações (ID) utilizadas no estudo no período de 2013-2014.

Figura 5. Desempenho estatístico do método Hargreaves e Samani (1982) com K_r proposto por Hargreaves (1994) e K_r calibrado Allen (1995) das 11 estações (ID) utilizadas no estudo no período de 2013-2014.

Conclusões

Na escala bianual, o método de Hargreaves e Samani (1982) com coeficientes proposto por Hargreaves (1994) e coeficiente calibrado Allen (1995, 1997) são variáveis de forma significativa em diferentes locais (estações) no estado do Rio de Janeiro, de acordo com os índices estatísticos adotados. Portanto, a metodologia usada no estudo é perfeitamente aplicável com ressalva na estimativa de radiação solar incidente diária no estado do Rio de Janeiro.

De uma maneira geral, o método Hargreaves e Samani segundo o fator de calibração

(K_r) não é satisfatório ao ser calibrado para as condições climáticas do local (estação) no estado do Rio de Janeiro, apenas mostrou ser significativo em estações próximas de corpos d'água, em situação contrária, apresenta superestimativa em regiões na ausência dessas condições. Contudo, Allen (1997) sugere que em regiões costeiras, o K_r seja determinado separadamente em duas porções do ano, pois havia notado que as estimativas de R_s tiveram resultados mais precisos. Baseado nos resultados obtidos neste estudo sugere-se a avaliação de outros métodos de calibração de K_r existentes na literatura.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao INMET por disponibilizarem os dados meteorológicos das estações meteorológicas automáticas.

Referências

- Aladenola, O. O.; Madramootoo, C. A. 2014. Evaluation of solar radiation estimation methods for reference evapotranspiration estimation in Canada. *Theoretical and Applied Climatology*, [online] 118. Disponível: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00704-013-1070-2>. Acesso: 15 jun. 2018.
- Allen, R. G. 1995. Evaluation of procedures for estimating mean monthly solar radiation from air temperature. *FAO Irrigation and drainage paper 56*. FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. [cit. 2018-12-09]. <<http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=XF2001396989>>
- Allen, R. G. 1996. Assessing integrity of weather data for reference evapotranspiration estimation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, [online] 122. Disponível: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1996\)122:2\(97\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1996)122:2(97)). Acesso: 19 Dez. 2018.
- Allen, R. G. (1997) - Self-calibrating method for estimating solar radiation from air temperature. *Journal of Hydrologic Engineering*, [online] 2. Disponível: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(1997\)2:2\(56\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(1997)2:2(56)). Acesso: 21 Dez. 2018.
- Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D. & Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. Disponível: <http://www.fao.org/docrep/x0490e/x0490e00.htm>. Acesso: 02 Mar. 2019.
- Allen, R.G.; Robison, C. W. 2016. Evapotranspiration and consumptive irrigation water requirements for Idaho Supplement updating the Time Series through December, Research Technical Completion Report, Kimberly Research and Extension Center, University of Idaho, Moscow, Disponível: <http://www.kimberly.uidaho.edu/ETIdaho>. Acesso: 09 Fev. 2019.
- Almorox, J.; Bocco, M.; Willington, E. 2013. Estimation of daily global solar radiation from measured temperatures at Cañada de Luque, Córdoba, Argentina. *Renewable Energy*, [online] 60. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.05.033>. Acesso: 15 jan. 2019.
- Álvares, C. A., Stape, J.L., Sentelhas, P.C., Gonçalves, J.L.M.; Sparovek, G. 2013. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, [online] 22. Disponível: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>. Acesso: 10 Out. 2018.
- Bandyopadhyay, A.; Bhadra, A.; Raghuwanshi, N. S.; Singh, R. 2008. Estimation of monthly solar radiation from measured air temperature extremes. *Agricultural and Forest Meteorology*, [online] 148. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2008.06.002>. Acesso: 15 Out. 2018.
- Borges, V. P.; Oliveira, A. S.; Filho, A. C. M.; Silva, T. S.; Pamponet, B. M. 2010. Avaliação de modelos de estimativa da radiação solar incidente em Cruz das Almas, Bahia. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, [online] 14. Disponível: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662010000100010>. Acesso: 10 Nov. 2018.
- Brito, T. T.; Oliveira Júnior, J. F.; Lyra, G. B.; Gois, G.; Zeri, M. 2017. Multivariate analysis applied to monthly rainfall over Rio de Janeiro state, Brazil. *Meteorology and Atmospheric Physics*, [online] 129. Disponível: <https://doi.org/10.1007/s00703-016-0481-x>. Acesso: 02 Dez. 2018.
- Burman, R.D.; Jensen, M.; Allen, R.G. 1987. Thermodynamic factors in evapotranspiration - *Irrigation Systems for the 21st Century*. Disponível: <https://www.nal.usda.gov>. Acesso: 23 Ago. 2018.
- Camargo, A.P.; Sentelhas, P. C. 1997. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo, Brasil. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, [online] 5. Disponível: <https://doi.org/10.31062/agrom.v25i2.26298>. Acesso: 16 Out. 2018.
- Carvalho, D. D.; Silva, D. D.; Souza, A. D.; Gomes, D. P.; Rocha, H. D. 2011. Coeficientes da equação de Angström-Prescott e sua influência na evapotranspiração de referência em Seropédica, RJ. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, [online] 15. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662011000800011>. Acesso: 25 Set. 2018.
- Chen, R.; Ersi, K.; Yang, J.; Lu, S.; Zhao, W. 2004. Validation of five global radiation models with measured daily data in China. *Energy Conversion and Management*, [online] 45.

- Disponível:
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2003.09.019>.
 Acesso: 23 Jun. 2018.
- Da Silva, C. R.; Silva, V. J.; Júnior, A.J.; Carvalho, H. P. 2012. Radiação solar estimada com base na temperatura do ar para três regiões de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, [online] 16, Disponível: <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662012000300008>. Acesso: 20 Jan. 2019.
- Da S Silva, V. J. ; Carvalho, F. J.; Silva, C. R; Atarassi, R. T.; Almorox, J. 2016. Solar radiation estimated from empirical models for the north of Minas Gerais, Brazil. *Bioscience Journal*, [online] 32. Disponível: <https://doi.org/10.14393/BJ-v32n1a2016-26169>. Acesso: 14 Fev. 2019.
- Delgado, R. C.; Oliveira-Júnior, J. F.; Gois, G.; Teodoro, P. E.; Rodrigues, R. A. 2017. Synoptic events associated with the land surface temperature in Rio de Janeiro. *Bioscience Journal*, [online] 33. Disponível: <https://doi.org/10.14393/BJ-v33n4a2017-33990>. Acesso: 11 Fev. 2019.
- Dereczynski, C. P.; De Oliveira, J. S.; Machado, C. O. 2009. Climatologia da precipitação no município do Rio de Janeiro. *Revista Brasileira de Meteorologia*, [online] 24. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-77862009000100003>. Acesso: 05 Mar. 2019.
- Donatelli, M.; Campbell, G.S. 1998. A simple model to estimate global solar radiation. In: Fifth Congress of the European Society for Agronomy, 1998, Nitra, Slovakia Republic. Proceeding... Nitra: Fifth Congress of the European Society for Agronomy, 2, 133-134.
- Donatelli, M.; Bellocchi, G. 2001. Estimate of daily global solar radiation: new developments in the software RadEst3.00. 2001. In: International Symposium on Modelling Cropping Systems, 2., Florence, 2001. Proceedings. Florence: Institute for Biometeorology, 2, 213-214.
- Escobedo, J. F.; Gomes, E. N.; Oliveira, A. P.; Soares, J. 2009. Modeling hourly and daily fractions of UV, PAT and NIR to global solar radiation under various Sky conditions at Botucatu, Brazil *Applied Energy*, [online] 86. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.04.013>. Acesso: 03 Fev. 2019.
- Grillone, G.; Agnese, C.; D'Asaro, F. 2012. Estimation of daily solar radiation from measured air temperature extremes in the mid-Mediterranean area. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vancouver, [online] 138. Disponível: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000480](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000480). Acesso: 15 Nov. 2018.
- Gois, G.; Souza, J. C. S.; Júnior, J. F.O.; Delgado, R. C.; Lyra, G. B.; Teodoro, P. E. 2016. Models to estimate incident solar radiation on Seropédica, Rio de Janeiro. *Bioscience Journal*, [online] 32. Disponível: <https://doi.org/10.14393/BJ-v32n2a2016-29877>. Acesso: 21 Nov. 2018.
- Hargreaves, G.H. 1994. Simplified coefficients for estimating monthly solar radiation in North America and Europe. Dept. Paper, Dept. Biol. and Irrig. Eng., Utah State Univ., Logan, Utah.
- Hargreaves, G. H.; Samani, Z. A. 1982. Estimating potential evapotranspiration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 108, 225-230.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Banco de dados disponível no sítio eletrônico Disponível: www.ibge.gov.br. Acesso: 13 Ago. 2018.
- Jahani, B.; Dinpashoh, Y.; Nafchi, A. R. 2017. Evaluation and development of empirical models for estimating daily solar radiation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [online] 73. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.124>. Acesso: 07 Mar. 2019.
- Legares, D. R.; McCabe, G. J. 1999. Evaluating the use of “goodnessoffit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research*, [online] 35, Disponível: <https://doi.org/10.1029/1998WR900018>. 11 Fev. 2019.
- Li, H.; Cao, F.; Wang, X.; Ma, W. 2014. A temperature-based model for estimating monthly average daily global solar radiation in China. *The Scientific World Journal*, [online] 9. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1155/2014/128754>. Acesso: 14 Mar. 2019.
- Lima, E. P.; Sedyama, G. C. 2006. Estimativa da radiação solar global a partir de dados de temperaturas máxima e mínima. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia. Belém, Pará. CBMET, p. 125-130.
- Lyra, G. B.; Zanetti, S S.; Amorim, A.; Lyra, G. B.; Oliveira Júnior, J. F.; Lemes, M. A. M. 2016. Estimation of monthly global solar irradiation using the Hargreaves–Samani model and an artificial neural network for the state of Alagoas in northeastern Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*, [online] 125. Disponível:

- <http://dx.10.1007/s00704-015-1541-8>. Acesso: 07 Jan. 2019.
- Moraes, N. O.; Pimentel, L. C. G.; Marton, E. 2005. Simulações Numéricas da Formação de Ilha de Calor na Região Metropolitana do Rio de Janeiro. *Anuário do Instituto de Geociências*, 28. 116-138.
- Nogueira, D. H.; Silva, M. G.; Ledo, E. R. F.; Araújo, E. M.; Araújo, E. 2012. Estimativa da radiação solar global (R_s) através da amplitude térmica diária. In: *INOVAGRI International Meeting e IV WINOTEC Workshop Internacional de Inovações Tecnológicas na Irrigação*. 2012.
- Okundamiya, M. S.; Emagbetere, J. O.; Ogujor, E. A. 2016. Evaluation of various global solar radiation models for Nigeria. *International Journal of Green Energy*, [online] 13. Disponível: <https://doi.org/10.1080/15435075.2014.968921>. Acesso: 11 Mar 2019.
- Oliveira Júnior, J. F.; Lyra, G. B.; Sperandio, L. 2015. Modelos de Zolnier e Campbell-Norman para estimativa da temperatura do ar no Rio de Janeiro. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental (Online)*, Campina Grande, [online] 19. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929>. Acesso: 12 Mar 2019.
- Quej, V. H.; Almorox, J.; Ibrakhimov, M.; Saito, L. 2016. Empirical models for estimating daily global solar radiation in Yucatán Peninsula, Mexico. *Energy Conversion and Management*, [online] 110. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.12.050>. Acesso: 10 Fev. 2019.
- Ramos, J.P.A; Vianna, M.S.; Marin, F.R. 2018. Estimativa da radiação solar global baseada na amplitude térmica para o Brasil. *Agrometeoros*, 26. 37-51.
- Samani, Z. 2000. Estimating solar radiation and evapotranspiration using minimum climatological data. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, [online] 126. Disponível: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2000\)126:4\(265\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2000)126:4(265)). Acesso: 10 Dez. 2018.
- Silva, W. L.; Dereczynski, C. P. 2014. Caracterização Climatológica e Tendências Observadas em Extremos Climáticos no Estado do Rio de Janeiro. *Anuário do Instituto de Geociências*, [online] 37. Disponível: https://doi.org/10.11137/2014_2_123_138. Acesso: 13 Out. 2018.
- Stone, R. J. 1993. Improved statistical procedure for the evaluation of solar radiation estimation models. *Solar Energy*, 51, 289-291.
- Souza, A.P.; Escobedo, J.F. 2013. Estimates of hourly diffuse radiation on tilted surfaces in Southeast of Brazil. *International Journal of Renewable Energy Research*, [online] 3. Disponível: <http://hdl.handle.net/11449/76675>. Acesso: 25 Out. 2018.
- Wanderley, H. S.; Fernandes, R. C.; Carvalho, A. L. Aumento das temperaturas extremas na cidade do Rio de Janeiro e o desvio ocasionado durante um evento de El Niño intenso. *Revista Brasileira de Geografia Física*. [online] 12. Disponível: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v12.4.p1291-1301>. Acesso: 26 Set 2019.
- Wahab, M. A. 2019. Simple model for estimating global solar radiation. *Solar & Wind Technology*. [online] 2. Disponível: [https://doi.org/10.1016/0741-983X\(85\)90029-3](https://doi.org/10.1016/0741-983X(85)90029-3). Acesso: 17 Abr. 2019.
- Willmott, C. 1981. On the validation of models. *Physical Geography*, [online] 2. Disponível: <https://doi.org/10.1080/02723646.1981.10642213>. Acesso: 20 Abr. 2019.
- Zeri, M.; Júnior, J. F.O.; Lyra, G. B. 2011. Spatiotemporal analysis of particulate matter, sulfur dioxide and carbon monoxide concentrations over the city of Rio de Janeiro, Brazil. *Meteorology and Atmospheric Physics*, [online] 113. Disponível: <https://doi.org/10.1007/s00703-011-0153-9>. 22 Abr. 2019.