



# Balço de radiaço utilizando métodos de estimativa da radiaço solar em cultivo de cana-de-açúcar

Joana Madeira Krieger<sup>1</sup>, Isabella Siqueira Vieira<sup>1</sup>, Wellerson de Oliveira Alves da Silva<sup>1</sup>, José Leonaldo de Souza<sup>2</sup>,  
Guilherme Bastos Lyra<sup>2</sup> e Gustavo Bastos Lyra<sup>1(\*)</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Rodovia BR 465, km 07, s/n, Zona Rural, CEP 23890-000 Seropédica, RJ.

E-mails: joanakrieger@gmail.com, isasv9@gmail.com, wellersondeoliveiraalvessilva@gmail.com e gblyra@ufrj.com.br

<sup>2</sup>Universidade Federal de Alagoas, Centro de Ciências Agrárias de Alagoas. CECA, Rodovia BR104, km 85, s/n, Mata do Rolo, CEP 57.100-000 Rio Largo, AL. E-mails: leonaldojs@yahoo.com.br e gbastoslyra@gmail.com

(\*)Autor para correspondência.

## INFORMAÇÕES

### História do artigo:

Recebido em 26 de setembro de 2019

Aceito em 4 de março de 2020

### Termos para indexação:

problemas inversos

modelagem Agrometeorológica

modelos lineares

## RESUMO

Devido à dificuldade de medidas contínuas e de qualidades das componentes do balanço de radiação, existe a necessidade de desenvolver modelos para estimá-las. Este trabalho ajustou os coeficientes dos métodos de Hargreaves-Samani (HaS) e Bristow-Campbell (BrC) para estimava da radiação solar global ( $R_s$ ), assim como o albedo ( $\alpha$ ) e os coeficientes de um modelo de balanço de ondas longas ( $R_{nl}$ ) em cultivo de cana-de açúcar na região de Rio Largo/AL. Medições das componentes do balanço ( $R_n$ ) de radiação foram realizadas no período de 03 a 27/06/2006 por um saldo radiômetro. Os coeficientes foram ajustados por meio de técnicas de problemas inversos (Levenberg-Marquardt). Após o ajuste, os modelos de balanço de ondas curtas ( $R_{ns}$ ),  $R_{nl}$  e  $R_n$  obtidos em função de  $R_s$  estimado por HaS e BrC foram comparados com observações dessas componentes. O método de BrC ajustado ( $\beta_0 = 0,478$ ,  $\beta_1 = 0,016$  e  $\beta_2 = 2,78$ ) teve maior precisão e exatidão que o método de HaS ( $k_t = 0,172$ ). Os métodos de  $R_s$  ajustados quando usados na estimava de  $R_{ns}$ ,  $R_{nl}$  e  $R_n$  tiveram estimativas acuradas. Os erros dos modelos quando usados  $R_s$  estimados por HaS e BrC foram em sua maioria, repasse dos erros obtidos na estimativa de  $R_s$ . Entretanto, os erros dos modelos, principalmente do  $R_{nl}$ , têm baixo impacto no  $R_n$ .

© 2020 SBAgro. Todos os direitos reservados.

## Introdução

No Brasil, o cultivo de cana-de-açúcar tem aumentado nas últimas décadas sua área plantada, em virtude da importância dada à questão energética mundial, além de seus produtos (álcool e açúcar) se destacarem como *commodities* agrícolas (Sá et al., 2016; Santos et al., 2017).

Atualmente, a cana-de-açúcar é o terceiro maior cultivo brasileiro em área plantada, atrás apenas da soja e do milho. Em 2016, os canaviais ocupavam 10,5 milhões de hectares, ou seja, 13,5 % do total nacional de área plantada no país (IBGE, 2017). Porém, para subsidiar o projeto e manejo dos cultivos de cana-de-açúcar é importante conhecer as condições de solo (características físico-hídricas e químicas).

cas, textura e composição) e atmosféricas (temperatura do ar, radiação solar, precipitação e evapotranspiração) (Azevedo et al., 2014).

A radiação solar global ( $R_s$ ) é geralmente usada como variável de entrada em modelos de simulação de crescimento e produtividade de culturas agrícolas, estimativas da evapotranspiração, em projetos de sistemas de geração de energia solar (e.g. fotovoltaicos) e de construções rurais e urbanas, entre outros. Entretanto, medidas da radiação solar são escassas nas estações meteorológicas convencionais (EMC) e as estações meteorológicas automáticas (EMA) apresentam séries curtas (< 15 anos), com falhas e problemas de qualidade (Lima et al., 2019). Segundo Liu et al. (2009), devido à dificuldade de mensuração contínua e de qualidade dessas variáveis, existe a necessidade de desenvolver métodos para estimá-las.

Os métodos de estimativa de  $R_s$  podem ser classificados em quatro tipos, baseados em: i) duração de horas de brilho solar (insolação); ii) nebulosidade; iii) temperatura do ar e; iv) outras variáveis meteorológicas (e.g. chuva e umidade relativa) (Besharat, Dehghan e Faghhi, 2013). Apesar da insolação ser medida com maior frequência que  $R_s$  nas EMC, essa variável ainda apresenta disponibilidade escassa em relação aos extremos de temperatura do ar. Assim, métodos baseados apenas nos extremos de temperatura se apresentam como alternativa prática para determinação de  $R_s$ . Entre os métodos baseados em temperatura do ar, destacam-se os propostos por Hargreaves & Samani (1985) e o Bristow & Campbell (1984). Contudo, para estimativas precisas e acuradas é necessário que esses métodos sejam ajustados as condições climáticas locais (Lyra et al., 2016, Lima et al., 2019).

A radiação solar (radiação de ondas curtas) ao incidir à superfície ( $R_s$ ), parte é refletida ( $R_r$ ) e outra parte é absorvida, sendo a fração absorvida definida como balanço de radiação de ondas curtas (i.e.  $R_{n,s} = R_s - R_r$ ). A fração refletida, pode ser obtida pelo produto do albedo ( $\alpha$ ) - coeficiente de reflexão de ondas curtas - por  $R_s$ , de forma que,  $R_r = \alpha R_s$ , sendo o albedo dependente do tipo de superfície. À superfície também emite radiação ( $L_a$ ) proporcional a sua temperatura (radiação de ondas longas) e emissividade  $e$ , incide sobre ela radiação emitida pela atmosfera ( $L_a$ ), também na forma de ondas longas. Essas duas componentes, permitem definir o balanço de radiação de ondas longas ( $R_{n,l} = L_a - L_s$ ). Assim, o balanço de radiação ( $R_n$ ) a superfície pode ser obtido pela relação  $R_n = R_{n,s} + R_{n,l}$  (Santos et al., 2017).

O saldo de radiação é importante para quantificação do balanço de energia à superfície, evapotranspiração, período de molhamento foliar e outros (Santos et al., 2017). Contudo, medidas de  $R_n$  (saldo radiômetro) são mais restritas do que  $R_s$ , sendo o uso de métodos ou modelos para sua estimativa uma abordagem usual.

Os métodos de estimativa de  $R_n$  e de suas componen-

tes irão melhor representar determinada região, bioma ou ecossistema, quando seus parâmetros e, ou coeficientes estiverem ajustados para as condições locais. A esses ajustes é dado o nome de calibração, que é um conjunto de simulações com o objetivo de afinar os valores dos coeficientes do modelo para que, se fisicamente consistentes, este descreva o que é observado. A calibração permite estudar cada caso de forma detalhada, para que os modelos sejam melhorados conforme as necessidades identificadas e os recursos disponíveis (Fontes, 2015).

Assim, este trabalho tem como objetivos: i) determinar os coeficientes empíricos dos métodos de Hargreaves-Samani e Bristow-Campbell para estimativa de  $R_s$ , assim como o albedo, para o balanço de ondas curtas e os coeficientes do balanço de ondas longas, por meio de algoritmos de problemas inversos (Levenberg-Marquardt) e ii) avaliar as estimativas do balanço de radiação com os métodos ajustados para cultivo de cana-de-açúcar em Rio Largo/AL.

#### Material e métodos

As componentes do balanço de radiação (balanço de radiação de ondas curtas: incidente -  $R_s$  e refletida -  $R_r$  e, ondas longas: emitida pela superfície -  $L_s$  e pela atmosfera -  $L_a$ ) foram medidas em experimento conduzido em cultivo de cana-de-açúcar, localizado na área experimental do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas (CECA/UFAL), em Rio Largo, Alagoas, Nordeste do Brasil (09° 28' 02" S; 35° 49' 43" W; 127 m). O clima da região, pela classificação de Thornthwaite, é megatérmico, com deficiência de água moderada no verão e excesso no inverno, a temperatura do ar anual é de 25,4°C e total de precipitação anual em torno de 1.800 mm (Souza et al., 2004).

Nas medições foi utilizado um saldo radiômetro (CNR1, Kipp e Zonen, Holanda), disposto a 0,5 m acima do dossel da cultura. Os sensores estavam conectados a um sistema automático de aquisição de dados (CR10X, Campbell Scientific Inc., EUA), que realizou medições a cada 10 s e, armazenou os fluxos médios a cada 10 min, no período de 03 a 27 de junho de 2006. O período de medições estava inserido na estação chuvosa da região (março a agosto), quando ocorrem 75 % da precipitação anual (Souza et al., 2004; Santos et al., 2017).

Na estimativa da radiação solar global (incidente) utilizaram-se dois métodos: i) Hargreaves-Samani (HaS) (Hargreaves & Samani, 1985), sugerido no boletim FAO-56 (Allen et al., 1998), quando indisponíveis medidas de radiação solar global ( $R_s$ , MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) e, ii) método de Bristow-Campbell (BrC) (Bristow & Campbell, 1984). Estes métodos são função dos extremos da temperatura do ar diária - máxima ( $t_x$ , °C) e mínima ( $t_n$ , °C) e da radiação solar extraterrestre ( $R_a$ , MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>), sendo apresentados a seguir:

$$R_s = R_a k_t (T_x - T_n)^{0,5} \quad (1)$$

$$R_s = R_a \beta_0 [1 - \exp(-\beta_1 (T_x - T_n)^{\beta_2})] \quad (2)$$

em que,  $\beta_0$  é a transmitância atmosférica máxima diária,  $k_r$ ,  $\beta_1$  e  $\beta_2$  são coeficientes empíricos e  $R_a$  ( $\text{MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$ ) é a radiação solar no topo da atmosfera ou extraterrestre.

$R_a$  foi calculada como apresentado por Allen et al. (1998) e descrito a seguir:

$$R_a = 37.56 d_r [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_s)] \quad (3)$$

em que,  $d_r$  (radianos) é a correção para a distância relativa Terra-Sol;  $\varphi$  é a latitude local (radianos);  $\omega_s$  é o ângulo horário entre o nascer e o pôr-do-sol (radianos);  $\delta$  é a declinação solar (radianos). As variáveis necessárias à estimativa de  $R_a$  foram calculadas por meio das seguintes relações:

$$d_r = 1 + 0,033 \cos\left(\frac{2\pi}{365}J\right) \quad (4)$$

$$\delta = 0,4093 \sin\left(\frac{2\pi}{365}J - 1,39\right) \quad (5)$$

$$\omega_s = \arccos(-\tan(\varphi)\tan(\delta)) \quad (6)$$

em que,  $J$  (dias) é o número de ordem do dia do ano ou dia juliano [1 - 365].

Um albedo ( $\alpha = R_r / R_s$ ) único para a superfície foi estimado para os dados observados por meio do modelo de *Big-Leaf*; em que,  $R_{ns}$  é o balanço de ondas curtas [ $\text{MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$ ].

$$R_{ns} = (1 - \alpha)R_s \quad (7)$$

O balanço de ondas longas ( $R_{nl}$ ,  $\text{MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$ ) foi estimado para os dados observados por meio da equação (Allen et al., 1998):

$$R_{nl} = \sigma \frac{t_{x,K}^4 + t_{n,K}^4}{2} (a - b e_a^{0,5}) \left( c \frac{R_s}{R_{so}} - d \right) \quad (8)$$

em que,  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzman [ $\text{MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}\text{K}^{-4}$ ],  $t_{x,K}$  e  $t_{n,K}$  são as temperaturas do ar máxima e mínima [K] e  $e_a$  é a pressão parcial do vapor d'água do ar [kPa]. Os coeficientes empíricos  $a$  e  $b$  são relacionados a umidade do ar, assim como  $c$  e  $d$  inferem sobre a nebulosidade do local.  $R_{so}$  é a radiação solar em dia sem nebulosidade [ $\text{MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$ ] e é pode ser obtida por

$$R_{so} = (a_s + b_s)R_a \quad (9)$$

em que,  $a_s$  é igual a 0,25 e  $b_s$  é igual a 0,50 conforme apresentado no boletim FAO56-.

O balanço de radiação total ( $R_n$ ) foi estimado por dois métodos: i) a partir da soma de  $R_{ns}$  (Eq. 07) e  $R_{nl}$  (Eq. 08) ( $R_{n,1}$ ) ou ii) por meio de regressão linear ajustada entre  $R_s$  e  $R_n$  ( $R_{n,2}$ ).

Os métodos foram implementados no ambiente de programação *Openmodel*, sendo os coeficientes empíricos e o albedo ajustados por meio do algoritmo de problema inverso de Levenberg-Marquardt (Marquardt, 1963). O algoritmo de Levenberg-Marquardt busca minimizar a soma dos quadrados dos resíduos [(observado - estimado)<sup>2</sup>] por método iterativo.

A otimização foi realizada por etapas individuais: i) Coeficientes dos métodos de HaS (Eq. 01) e BrC (Eq. 02), considerando  $R_s$  medido, ii) Albedo (Eq. 07) em função de  $R_s$  e  $R_r$  medida e iii) Coeficientes ( $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ ) do balanço de ondas longas (Eq. 08) realizada com as medições de  $R_{n,1} = L_a - L_s$ .  $R_n$  foi também ajustado, por meio de regressão linear simples a radiação solar global ( $R_{n,2} = \beta_1 R_s$ ), em que  $\beta_1$  é o coeficiente angular da regressão, ajustado por meio do método dos mínimos quadrados.

Os coeficientes ajustados foram então utilizados para estimar  $R_s$  pelos métodos de HaS e BrC e, depois usados para determinar  $R_{ns}$  e  $R_{nl}$  e, finalmente,  $R_{n,1}$  e  $R_{n,2}$ . Assim, resultou em duas estimativas de cada componente do balanço de radiação e do próprio balanço ( $R_{n,1}$ ), uma considerando  $R_s$  determinado por HaS e outro por BrC.

Todas as estimativas foram avaliadas por meio da regressão linear simples (Eq. 10) e de índices estatísticos que inferem sobre: a) precisão: coeficiente de determinação ( $r^2$ ); b) exatidão: índice de Willmott ( $d_w$ ) e raiz do quadrado médio do erro absoluto e percentual (RQME).

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X \quad (10)$$

em que,  $Y$  são as componentes da radiação ( $R_s$ ,  $R_{ns}$ ,  $R_{nl}$  e  $R_n$ ) estimadas pelos diversos métodos, e  $X$  são as observadas ( $^{\circ}\text{C}$ ). Com base na regressão, foi obtido também o seu coeficiente de determinação ( $r^2$ ), que nesse caso representa a precisão das estimativas. A média e a variância entre as componentes da radiação observadas e estimadas foram avaliadas pelos teste-t e teste F ( $p < 0,05$ ), respectivamente. O teste-t também foi utilizado para avaliar estatisticamente o intercepto e a inclinação da regressão linear ( $H_0: \beta = 0$  e  $H_a: \beta \neq 0$ ).

O índice de concordância (exatidão) de Willmott ( $d_w$ ) (Willmott, 1981) e a RQME ( $\text{MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$ ) foram determinados pelas relações a seguir:

$$d_w = 1 - \left[ \frac{\sum(Y_i - X_i)^2}{\sum(|X_i - \bar{X}| + |X_i - X|)^2} \right] \quad (11)$$

$$RQME = \sqrt{\frac{\sum(X_i - Y_i)^2}{n - 1}} \quad (12)$$

em que,  $Y_i$  representa os valores estimados;  $X_i$  os valores observados e  $X$  a média dos valores observados.

## Resultados e discussão

Radiação solar global - métodos de Hargreaves-Samani e Bristow-Campbell

Os coeficientes empíricos ajustados para os dois métodos de estimativa de  $R_s$  foram  $k_r = 0,172$  para HaS e  $\beta_0 = 0,478$ ,  $\beta_1 = 0,016$  e  $\beta_2 = 2,78$  para BrC. O método de BrC apresentou melhor precisão, representada pelo  $r^2$ , com superioridade de quase 0,1 em relação as estimativas de HaS (Tabela 1). A exatidão do BrC também foi melhor, com  $dw$  com mais de 0,15 de diferença para o método de HaS. O  $RQME$ , tanto absoluto, quanto percentual também confirmaram a superioridade do BrC em estimar  $R_s$ . A superioridade do método de BrC em relação a HaS foi observada também por Santos et al. (2014) e Lima et al. (2019). Lima et al. (2019) comentam que esse resultado se deve ao maior número de coeficientes do método BrC (três) em relação a HaS (um), que permite maior flexibilidade de BrC no ajuste.

A análise do desempenho dos métodos pode ser inferida pela dispersão entre os dados estimados versus observados (Figura 1). Também se observou tendência a superestimativa (subestimativa) para valores menores (maiores) que  $12,5 \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$  em ambos os métodos. Os resultados das estimativas para os métodos de HaS e BrC são apresentados na Figura 1, em que se destaca que a superioridade do BrC está relacionada a melhor estimativa nos dias de extremos da radiação solar.

Hargreaves (1994) propuseram valores de  $k_r$  diferentes para regiões próximas a costa, sendo esse igual a 0,190, e para o interior, igual a 0,162. Lyra et al. (2016) ajustou o método de HaS para estimativa de  $R_s$  mensal na região de Maceió/AL, utilizando os dados coletados e disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e obteve, nesse caso,  $k_r$  de 0,189. Os autores concluíram que utilizar o  $k_r$  ajustado para o local de estudo resulta em maior preci-

**Tabela 1.** Coeficiente de determinação ( $r^2$ ), índice de Willmott ( $dw$ ) e raiz do quadrado médio do erro absoluto e percentual ( $RQME$ ) para os métodos (Hargreaves-Samani e Bristow-Campbell) propostos para a relação dos dados estimados e observados de radiação solar global ( $R_s$ ).

Método	$r^2$	$dw$	$RQME$ ( $\text{MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$ )	$RQME$ (%)
Bristow-Campbell	0,38	0,74	2,04	16,3
Hargreaves-Samani	0,30	0,58	2,21	17,6

são e exatidão das estimativas de  $R_s$ , que considerar o valor de  $k_r$  proposto por Hargreaves (1994).

Para avaliar os resultados obtidos, ressaltou-se que Gois et al. (2016) concluíram que  $k_r$  sugerido para HaS resultou em estimativas satisfatórias de  $R_s$  para Seropédica/RJ. Os autores encontraram  $r^2 = 0,93$  para as estimativas de  $R_s$ . Entretanto, a avaliação estatística da exatidão das estimativas foi de aproximadamente  $14 \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$  para  $RQME$  e 0,45 para  $dw$ , sendo inferiores aos reportados neste trabalho.

Bristow & Campbell (1984) propuseram valores de  $\beta_0 = 0,7$ ,  $\beta_1 = 0,005$  e  $\beta_2 = 2,0$ . Castellví (2008) aplicou o BrC para cinco locais diferentes nos EUA, França e Espanha. Nestas condições, ele obteve valores de  $\beta_0$  variando entre 0,75 e 0,77, para  $\beta_1$  foram apresentados valores entre 0,11- e 0,65- e  $\beta_2$  entre 1,6 e 2,0. A precisão avaliada por  $r^2$  variou entre 0,78 e 0,88 e a exatidão foi inferida pelo  $RQME$  e apresentou resultados entre 2,81 e  $5,44 \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$ .

Dos Santos et al. (2014) ajustaram os coeficientes dos métodos HaS e BrC para  $R_s$  diária para vários locais do estado de Alagoas. Neste trabalho foram encontrados valores para  $\beta_0$  entre 0,580 e 0,887, para  $\beta_1$  entre 0,033 e 0,103 e  $\beta_2$  entre 1,096 e 2,517 e para  $k_r$  entre 0,160 e 0,201. Para as condições propostas, a exatidão obtida inferida pelo  $RQME$  foi de aproximadamente 2,6 e  $2,5 \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$  para HaS e BrC, respectivamente. Lima et al. (2019) para  $R_s$  estimado por HaS e BrC com os coeficientes ajustados para o estado do Rio de Janeiro ( $0,134 \leq k_r \leq 0,262$  - HaS e  $0,588 \leq \beta_0 \leq 0,684$ ,  $0,07 \leq \beta_1 \leq 0,884$  e  $0,347 \leq \beta_2 \leq 2,441$ ) observaram  $r^2 > 0,55$  e  $d > 0,75$ , com  $RQME < 3,85 \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$ .

Importante destacar que os maiores erros de estimativa de ambos os métodos foram entre os dias 169 a 171, pois esses foram dias de maior incidência de radiação solar na série e entre dois dias (168 e 172) com ocorrência de chuvas superior a 20 mm. Para os fins desse estudo, esses dias não foram descartados das análises.

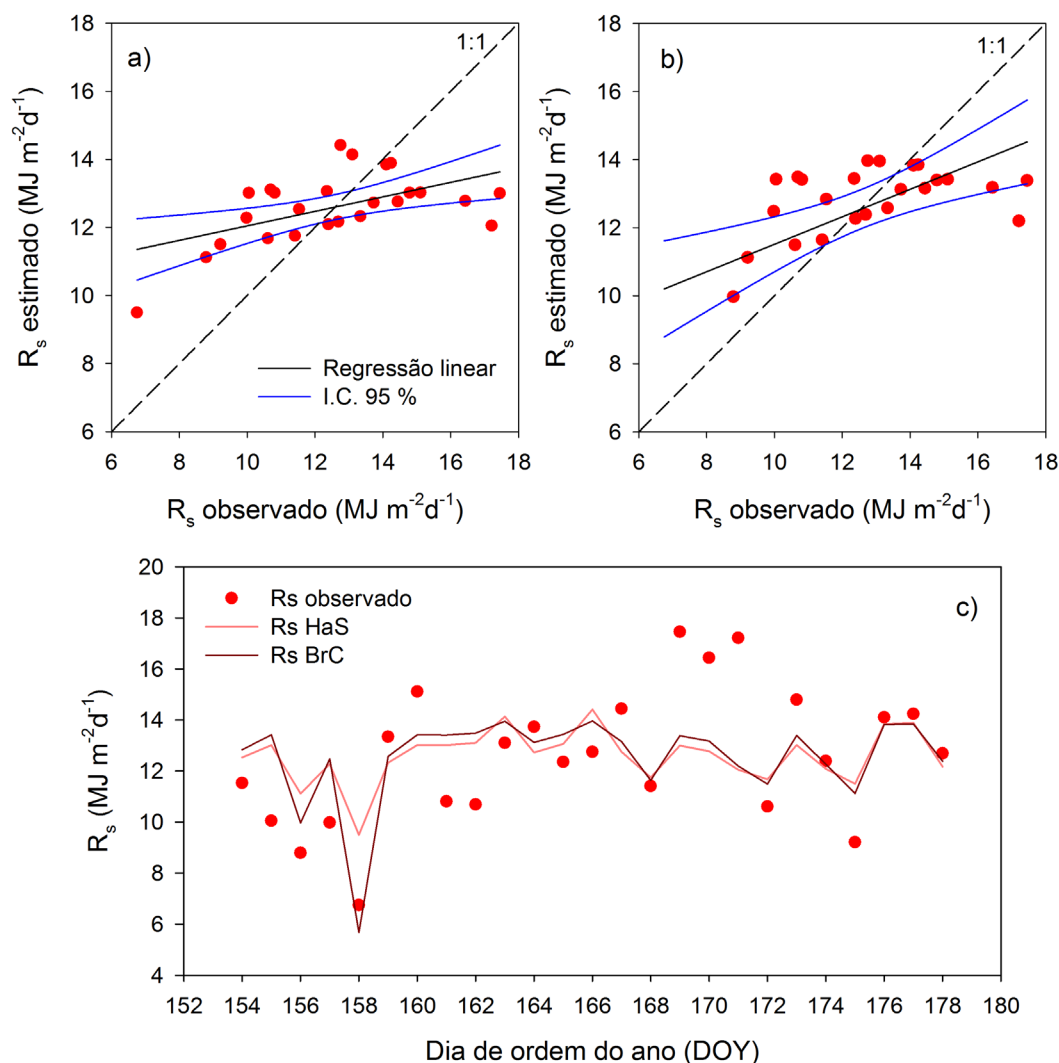
## Balanco de radiação

### Radiação solar global observada

O albedo e os parâmetros empíricos ajustados em função dos dados observados de  $R_{ns}$  ( $\alpha = 0,1856$ ) e  $R_{nl}$  ( $a = 0,4785$ ,  $b = 0,1369$ ,  $c = 0,2059$  e  $d = 0,0563$ ) foram avaliados quanto a sua precisão e exatidão (Tabela 2).  $R_{ns}$  estimado com  $R_s$  observado teve alta precisão ( $r^2 > 0,99$ ) e exatidão ( $d_w > 0,99$ ) que foram confirmados por pequena dispersão observada na Figura 2a.

A relação de  $R_{nl}$  em função dos dados observados apresentou alta exatidão, inferido por  $dw$  superior a 0,9, mas não teve precisão ( $r^2 = 0,73$ ) nos mesmos níveis que foi obtido por  $R_{ns}$ . Isso ocorreu principalmente pela simplificação no modelo de estimativa de  $R_{nl}$ , que considerou apenas a influência do vapor d'água no ar e da nebulosidade na

**Figura 1.** Relação linear entre a radiação solar global (Rs) observada e estimada pelos métodos: a) Hargreaves-Samani - HaS e b) Bristow-Campbell - BrC e c) variação de Rs observada e estimada para a região de Rio Largo, AL.



**Tabela 2.** Coeficiente de determinação ( $r^2$ ), índice de Willmott (dw) e raiz do quadrado médio do erro absoluto e percentual (RQME) para os modelos de balanço de radiação de ondas curtas (Rns), balanço de radiação de ondas longas (Rnl) e balanço de radiação total calculado pela soma de Rns e Rnl (Rn,1) para a relação dos dados estimados e observados.

	$r^2$	dw	RQME (MJ m-2d-1)	RQME (%)
Rns	0,9992	0,9997	0,07	0,71
Rnl	0,7332	0,9172	0,19	21,3
Rn,1	0,9862	0,9963	0,22	2,36

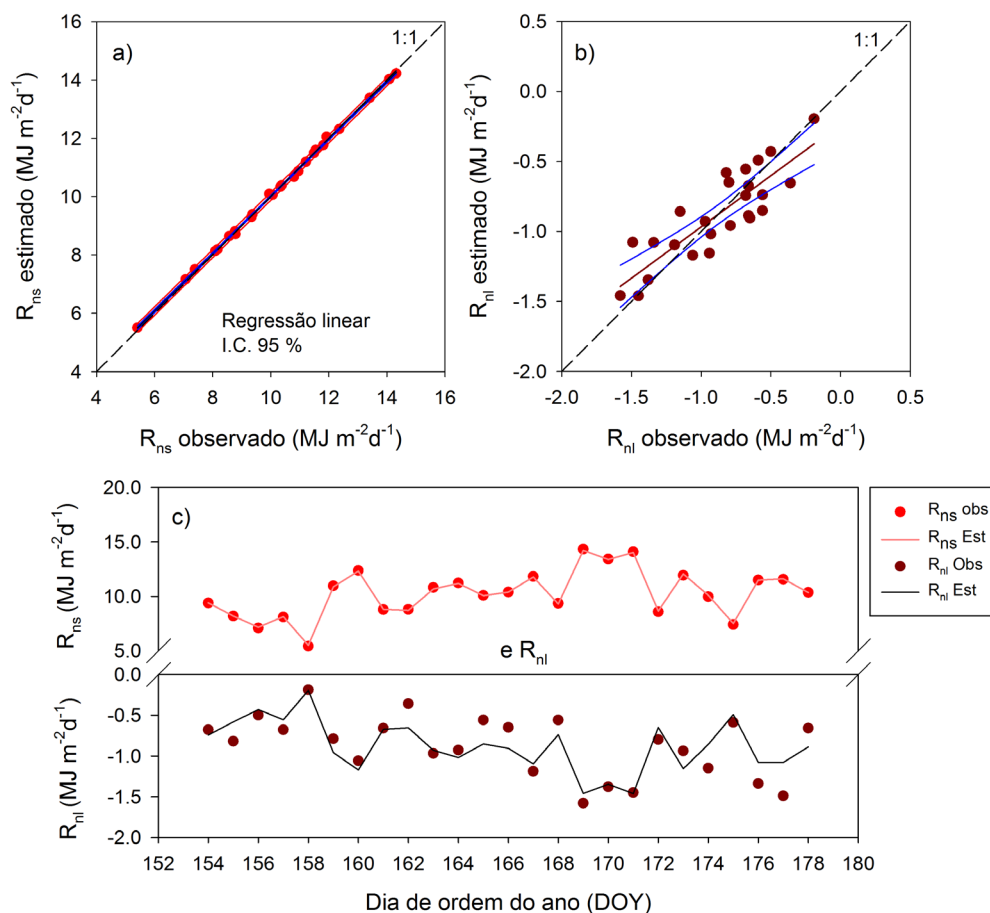
determinação da emissividade combinada superfície/atmosfera e a temperatura da superfície foi aproximada pela temperatura do ar. Na Figura 2b, observou-se que os erros ocorreram com tendência a superestimativa (subestimativa) para valores menores (maiores) que aproximadamente  $-0,8 \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$ . A variação do balanço de radiação de ondas

curtas e longas observados e estimados são apresentados na Figura 2c.

Azevedo et al. (2014) encontraram valores para o albedo diário da cultura de cana-de-açúcar entre 0,173 e 0,274, para as observações no mês de junho em Capim/PB. Para agosto e setembro, o albedo variou de 0,23 a 0,29 ao final do estágio de maturação dos colmos. O valor médio para o estágio de desenvolvimento de colmos variou entre 0,19 e 0,30, para o estágio de maturação foi encontrado o valor de 0,27 e a média para todo o período de observação foi de 0,2285. Silva et al. (2011) realizaram seu experimento em Juazeiro/BA, semiárido brasileiro e, obtiveram, para o ciclo da cana-de-açúcar, albedo médio de  $0,23 \pm 0,03$ , com variações entre 0,15 e 0,27. Santos et al. (2017) observaram albedo diário para a cana-de-açúcar variando de 0,15 a 0,17 (média  $0,16 \pm 0,004$ ) durante o estágio de desenvolvimento da cultura e entre 0,18 a 0,21 (média  $0,20 \pm 0,01$ ) no estágio intermediário, segundo a classificação do FAO56 (Allen et al., 1998).



**Figura 2.** Relação linear entre a) balanço de radiação de ondas curtas ( $R_{ns}$ ) e o b) balanço de radiação de ondas longas ( $R_{nl}$ ) observado e estimado e c) variação  $R_{ns}$  e  $R_{nl}$  observado e estimado para a região de Rio Largo, AL.



modelo de estimativa de  $R_{nl}$  aplicado a cultura hipotética (características similares a grama), os valores de  $a = 0,34$ ,  $b = 0,14$ ,  $c = 1,35$  e  $d = 0,35$ . Para cultura de milho plantada no dia 04 de junho de 2001 na mesma região experimental deste trabalho, Souza et al. (2002) encontraram para o estágio fenológico entre emergência e quatro folhas o valor de  $R_{nl}$  igual a  $-2,4 \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$ , para o estágio fenológico entre florescimento/polinização e grão leitoso o valor de  $R_{nl}$  era de  $-2,3 \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$  e, para o estágio de maturação fisiológica, o valor de  $R_{nl}$  encontrado foi de  $-0,5 \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$ .

Sá et al. (2016) avaliaram o saldo de radiação em cultivo de cana-de-açúcar utilizando o modelo SEBAL com imagens de sensores remotos orbitais (MODIS) em Juazeiro – BA. O erro relativo do albedo foi entre 11,7 a 54,5 %, enquanto para os componentes do balanço de ondas longas, os erros foram de 0,5 a 6,3 % para  $L_a$  e 0 a 12,4 % para  $L_s$ . No caso de  $R_n$  diário os erros foram de 3,8 a 16 %.

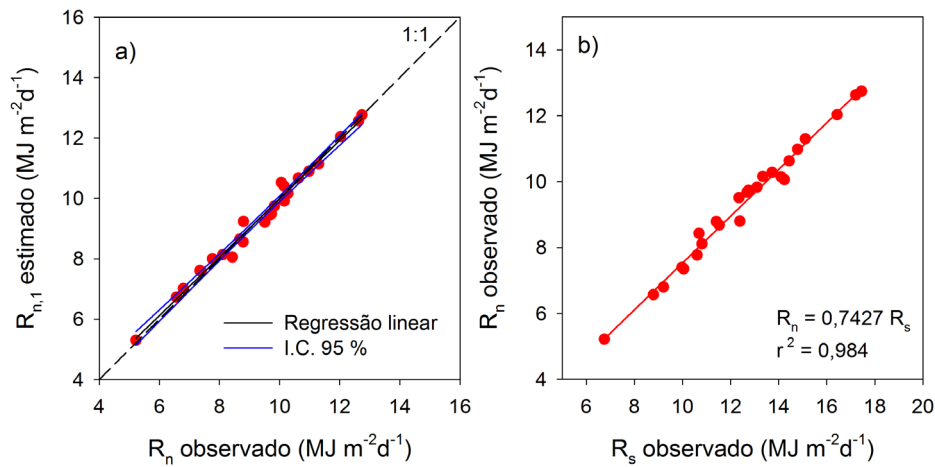
Para fins de comparação, destaca-se que Aguiar et al. (2011) estimaram a radiação de ondas longas por meio de sete modelos para a região sudoeste da Amazônia em área de pastagem e floresta entre 2005 e 2006. Na mesma época levantada neste trabalho, foram apresentados valores men-

sais utilizando 23 dias de dados para pastagem e oito para floresta. Com isso, eles encontraram precisão dos modelos, inferida por  $r^2$ , entre 0,50 e 0,70 para floresta e 0,61 e 0,85 para pastagem. A exatidão avaliada por  $RQME$  apresentou valores entre 0,72 e 2,64  $\text{MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$  para floresta e entre 0,48 e 1,68  $\text{MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$  para pastagem.

Devido a maior contribuição de  $R_{ns}$  em  $R_n$  (Figura 3a), observou-se boa precisão ( $r^2 = 0,986$ ) e exatidão ( $d_w = 0,917$ ) na comparação de  $R_n$  observado e  $R_{n,1}$  estimado pela soma de  $R_{ns}$  e  $R_{nl}$  estimados em função de  $R_s$  observado (Tabela 2).

Por ser de conhecimento, que  $R_s$  e  $R_n$  tem relação linear, como mencionado anteriormente (Figura 3b), juntamente com o valor da inclinação dessa reta que traduz a relação entre essas informações, ou seja,  $R_{n,2} = 0,7427 R_s$ , com  $r^2 = 0,9836$ . Souza et al. (1999) estimaram o balanço de radiação para uma cultura de feijão-vagem na região de Botucatu, São Paulo e encontraram valores para a inclinação da reta de  $R_s$  por  $R_n$  de 0,630, 0,530 e 0,598 para as fases vegetativa, reprodutiva e para o ciclo, respectivamente. Franco et al. (2013) desenvolveram seu estudo para cultura de cana-de-açúcar na região noroeste do estado de São Paulo e apresentaram os valores

**Figura 3.** Relação linear entre a) balanço de radiação total ( $R_{n,1}$ ) calculado a partir da soma do balanço de radiação de ondas curtas ( $R_{ns}$ ) e de ondas longas  $R_{nl}$  e b) balanço de radiação total ( $R_{n,2}$ ) calculado por meio da relação linear entre a radiação solar global ( $R_s$ ) e  $R_n$  observado para a região de Rio Largo, AL.



da fração de  $R_n/R_s$  igual a 0,36 em 2011/07/15 e 0,46 em 2011/11/04.

### Radiação solar global estimada

Os resultados dos ajustes dos coeficientes empíricos obtidos com os dados observados foram usados para estimar os valores  $R_{ns}$  e  $R_{nl}$  para cada método proposto (Tabela 3). Quanto a  $R_{ns}$ , observou-se que para ambos os métodos houve estimativas com padrões semelhantes ao observado para  $R_s$  estimado por eles. Com isso, foi possível inferir que os erros obtidos nessas estimativas foram repassados pelos resultados calculados para  $R_s$  por cada método. Esse resultado pode ser observado na Figura 4 a e b, que apresentou a dispersão entre os dados estimados e observados para os dois métodos. Em ambos os métodos se observou tendência de superestimativa (subestimativa) para valores menores (maiores) que aproximadamente 10  $MJ\ m^{-2}d^{-1}$ .

Então, da mesma forma, o BrC apresentou melhores resultados quanto a sua precisão e exatidão. Novamente observou-se melhores estimativas pelo BrC nos dias de extremos de  $R_s$ . Os maiores erros ocorrem nos dias 169 a 171, devido aos maiores totais de chuvas nos dias anterior e posterior (168 e 172).

O ajuste dos parâmetros empíricos de  $R_{nl}$  não apresentou resultados estatísticos tão bons quanto ao  $R_{ns}$  como apresentado anteriormente (Figura 4 c e d). Com isso, foram observados erros ainda maiores na estimativa de  $R_{nl}$ , quando utilizado os métodos de estimativa de  $R_s$  propostos como avaliado pelos índices estatísticos da Tabela 3. Na Figura 4 c e d foi possível observar tendência de superestimativa por ambos os métodos, principalmen-

**Tabela 3.** Coeficiente de determinação ( $r^2$ ), índice de Willmott ( $dw$ ) e raiz do quadrado médio do erro absoluto e percentual (RQME) para os modelos de balanço de radiação de ondas curtas ( $R_{ns}$ ), balanço de radiação de ondas longas ( $R_{nl}$ ) e balanço de radiação total calculado pela soma de  $R_{ns}$  e  $R_{nl}$  ( $R_{n,1}$ ) e por meio da relação linear entre  $R_s$  e  $R_n$  ( $R_{n,2}$ ) utilizando cada método (Hargreaves-Samani – HaS e Bristow-Campbell - BrC) proposto para a relação dos dados estimados e observados.

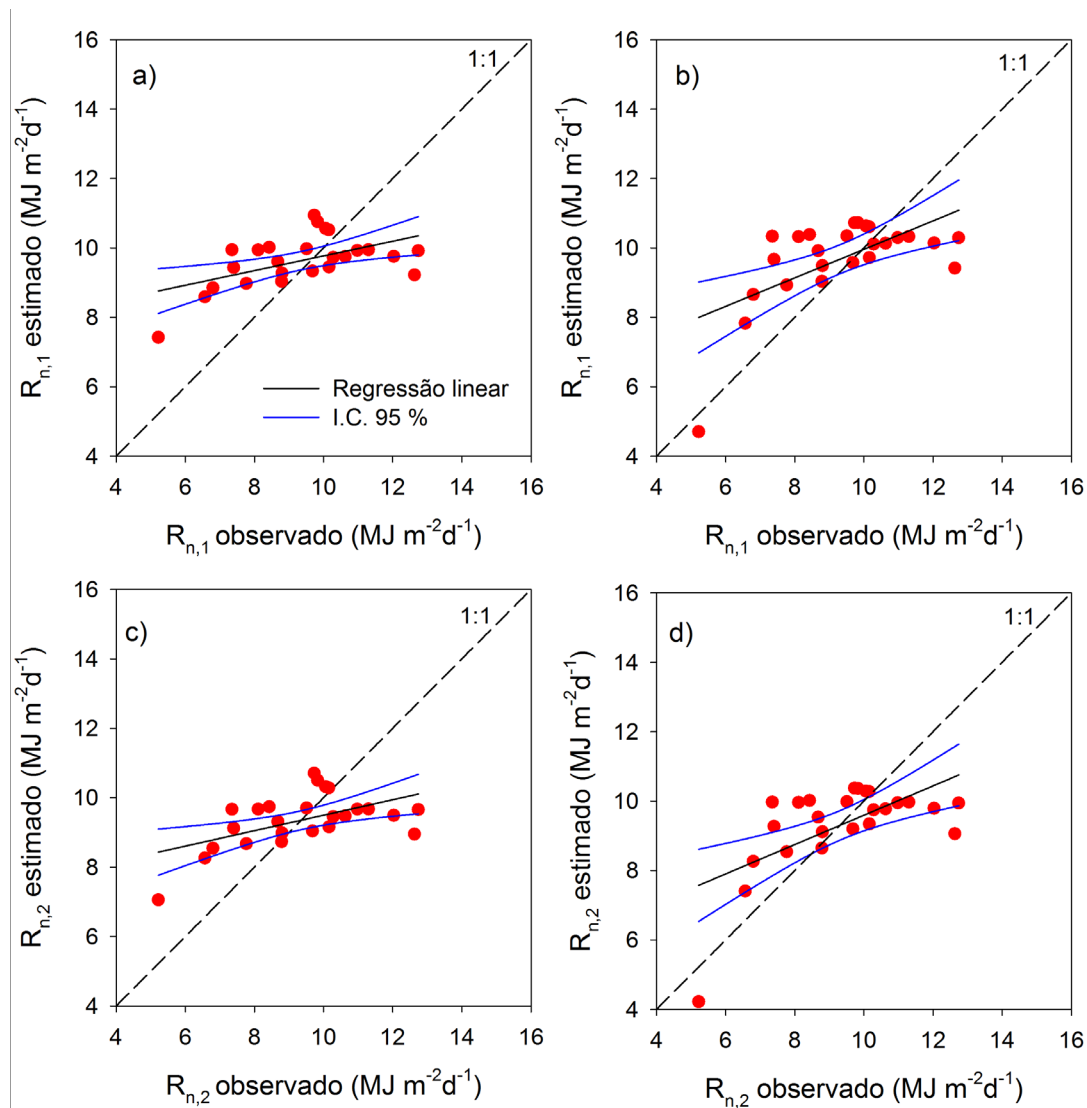
		$r^2$	$dw$	RQME (MJ m-2d-1)	RQME (%)
Rns	HaS	0,3003	0,5729	1,82	17,9
	BrC	0,3850	0,7418	1,69	16,5
Rnl	HaS	0,2576	0,5396	0,42	47,2
	BrC	0,2854	0,5979	0,40	45,2
Rn,1	HaS	0,2907	0,5697	1,61	17,2
	BrC	0,3810	0,7418	1,50	16,1
Rn,2	HaS	0,2989	0,5879	1,57	16,8
	BrC	0,3864	0,7513	1,46	15,6

te para valores menores que aproximadamente – 0,5  $MJ\ m^{-2}d^{-1}$ .

Neste caso, destacou-se a dificuldade dos dois métodos em estimar valores de extremos e que o modelo para estimativa de  $R_{nl}$  têm maiores dificuldades de estimar os valores para dias com maior incidência de radiação solar na utilização dos métodos.

Como forma de avaliar a influência dos erros das estimativas dos balanços de radiação de onda curta e longa, foram avaliadas duas proposições de cálculo do balanço de radiação total, como explicado anteriormente. A precisão e exatidão atingidas por ambas às propostas tiveram baixa diferença para os dois métodos: para a precisão expressa por  $r^2$  a diferença foi na terceira casa decimal e para a

**Figura 4.** Relação linear entre o balanço de radiação de ondas curtas -  $R_{n1}$  (a, b) e ondas longas ( $R_{n2}$ ) (c, d) -  $R_{ni}$  observada e estimada com base nos métodos de Hargreaves-Samani - HaS (a, c) e Bristow-Campbell - BrC (b, d) para a região de Rio Largo, AL.



exatidão inferida por  $dw$ , por exemplo, a diferença foi na segunda casa decimal (Tabela 3).

Apesar de as duas formas de calcular  $R_s$  terem resultados estatísticos similares, notou-se na Figura 5 a, b que a estimativa de  $R_n$  pela soma de  $R_{ns}$  e  $R_{ni}$  teve a tendência de superestimar (subestimar) os valores quando menores (maiores) que aproximadamente  $10 \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$ , enquanto que para a outra forma de estimativa, esse valor foi em torno de  $9 \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$  para ambos os métodos de cálculo de  $R_s$ . Ademais, nas duas formas de cálculo da estimativa de  $R_n$ , o método de BrC apresentou melhores resultados quanto a precisão e exatidão.

Os resultados das estimativas de  $R_n$  obtidas pelos dois métodos propostos e calculado das duas formas apresentadas foram exibidos na Figura 5. A mesma dificuldade de ambos os métodos em estimar os valores de extremos também foi observada para  $R_n$  calculado das duas

formas. Com isso, essa informação afirma que a maior parte dos erros observados no cálculo do balanço de radiação provém da estimativa da radiação solar global. Dessa forma, apesar de  $R_{ni}$  apresentar erros estatísticos, esses têm menor influência na estimativa de  $R_n$ , especialmente por tratar de quantidade de radiação em torno de uma ordem de grandeza menor que  $R_s$ .

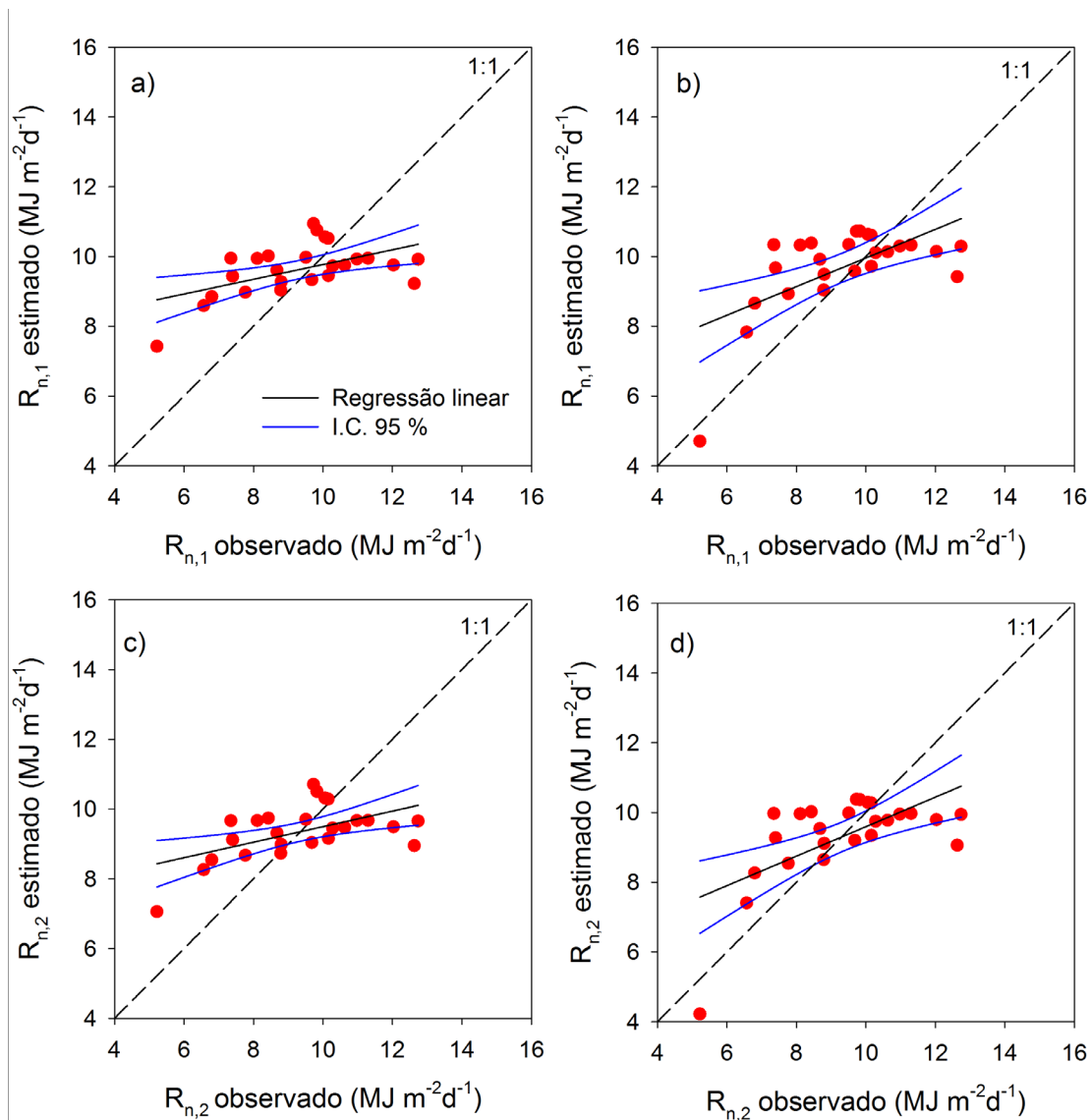
Ainda, a diferença no limite entre superestimativa e subestimativa entre as duas formas de cálculo de  $R_n$  apontada anteriormente pode ser percebida na Figura 5, principalmente nos dias de extremos como o 156, 158 e 173.

### Conclusão

Para as condições experimentais, o método de Bristow-Campbell ajustado apresenta melhor estimativa da radia-



**Figura 5.** Relação linear entre o balanço de radiação total ( $R_n$ ):  $R_{n,1}$  - estimado pela soma dos balanços de ondas curtas e longas (a, b) e  $R_{n,2}$  - determinado pela relação linear entre  $R_n$  e radiação solar global -  $R_s$  (c, d) observada e estimada com base nos métodos de Hargreaves-Samani - HaS (a, c) e Bristow-Campbell - BrC (b, d) para a região de Rio Largo, AL.



ção solar global. O método de Hargreaves-Samani apresenta precisão e exatidão inferiores, principalmente, por ter maior dificuldade de estimar a radiação em dias de valores extremos de radiação solar global.

Os modelos com o albedo e os coeficientes ajustados para a estimativa do balanço de radiação de ondas curtas e longas, retornam estimativas acuradas. Quando são utilizados para estimativa com os resultados de radiação solar global pelos métodos empíricos, os erros observados são, em sua maioria, o repasse de erros obtidos na estimativa da radiação solar. Os erros repassados nestes ajustes, principalmente, do balanço de radiação de ondas longas, têm baixo impacto no balanço de radiação total. Dessa forma, os balanços de radiação estimados utilizando o método de Bristow-Campbell apresentam melhores resultados que com o método de Hargreaves-Samani.

Os modelos devem ter seus parâmetros ajustados as condições atmosféricas e, ou a vegetação local para melhor estimarem os componentes do balanço de radiação.

#### Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Alagoas - FAPEAL pelo auxílio financeiro. O último autor agradece ao CNPq pela bolsa de produtividade em pesquisa, processo nº 312373/2018-0.

## Referências

- AGUIAR, L. J. G. et al. Estimativa da Radiação de Onda Longa Atmosférica em áreas de Floresta e de Pastagem no Sudoeste da Amazônia. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.26, n.2, 215 - 224, 2011.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 300 p. (FAO – Irrigation and Drainage Paper, 56).
- AZEVEDO, P. V. et al. Disponibilidade energética para a cultura da cana-de-açúcar nos tabuleiros costeiros do estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.18, n.10, p.1031-1038, 2014.
- BESHARAT, F.; DEGHAN, A.A.; FAGHIH, A.R. Empirical models for estimating global solar radiation: a review and case study. **Renew Sustain Energy Rev** 21:798-821. 2013.
- BRISTOW, K.L.; CAMPBELL, G.S. On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature. **Agricultural and Forest Meteorology**. v. 31, p.150-166. 1984.
- CASTELLVÍ, F. Evaluation of Three Practical Methods for Estimating Daily Solar Radiation in Dry Climates. **The Open Atmospheric Science Journal**, v. 2, p. 185-191. 2008.
- DOS SANTOS, C. M. et al. On modeling global solar irradiation using air temperature for Alagoas State, Northeastern Brazil. **Energy**. 2014.
- FONTES, V. C. **Calibração Automática Multi-sítio e Multi-objetiva de um Modelo de Superfície Terrestre**. 2015. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Aplicada) - Universidade Federal de Viçosa.
- FRANCO, R. A. M. et al. Avaliação do balanço de energia em diferentes tipos de uso e cobertura da terra na região noroeste do Estado de São Paulo. **Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, INPE, Foz do Iguaçu, PR, Brasil. 2013.
- GOIS, G. et al. Models to Estimate Incident Solar Radiation on Seropédica, Rio de Janeiro. **Biosci. J.**, v. 32, n. 2, p. 505-513, Uberlândia, Mar./Apr. 2016.
- IBGE. **A geografia da cana-de-açúcar**. Coordenação de Geografia. Rio de Janeiro: IBGE, 2017. 172p.
- HARGREAVES, G.H., SAMANI, Z.A. Reference Crop Evapotranspiration from Temperature. **Appl. Eng. Agric.** 1, 96-99. 1985.
- HARGREAVES, G.H.: **Simplified coefficients for estimating monthly solar radiation in North America and Europe**, 1994.
- LIMA, A. O. et al. Assessment of monthly global solar irradiation estimates using air temperature in different climates of the state of Rio de Janeiro, Southeastern Brazil. **SN Applied Sciences**, 1(9), 1002. 2019.
- LYRA, G.B. et al. Estimation of monthly global solar irradiation using the Hargreaves-Samani model and an artificial neural network for the state of Alagoas in northeastern Brazil. **Theor Appl Climatol**. 125(3-4), 743-756. 2016.
- LIU, X. et al. Evaluation of temperature-based global solar radiation models in China. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.149, p. 1433-1446, 2009.
- MARQUARDT, D. An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters. **SIAM Journal on Applied Mathematics**. 11 (2): 431-441. 1963.
- SÁ, P. C. C. D. Estimativa do saldo de radiação em cultivo irrigado de cana-de-açúcar utilizando dados de sensoriamento remoto orbital. **Revista Brasileira de Geografia Física** v.09, n.07, 2164-2178. 2016.
- SANTOS, C. M. et al. On modeling global solar irradiation using air temperature for Alagoas State, Northeastern Brazil. **Energy**, 71, 388-398, 2014.
- SANTOS, M. A. et al. Observed and modelled solar radiation components in sugarcane crop grown under tropical conditions. **International Agrophysics**, [s.l.], v. 31, nº 2, p. 2017 ,241-231.
- SILVA, T. G. F. et al. Variação do balanço de radiação e de energia da cana-de-açúcar irrigada no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, p.139-147, 2011.
- SOUZA, J. L. et al. Albedo e Estimativas do Saldo de Radiação em Feijão-Vagem sob Cobertura de Plástico e Ambiente Externo. **Pesq. Agropec. Bras.**, v.34, n.10, p.1763-1774, Brasília, out. 1999.
- SOUZA, J. L. et al. Balanço de Radiação em Cultivo de Milho (*Zea Mays L.*) na Região de Tabuleiro Costeiro do Estado de Alagoas. In: **XII Congresso Brasileiro de Meteorologia**, Foz de Iguaçu-PR, 2002.
- SOUZA, J. L. et al. Análise da Precipitação e Temperatura do ar na região do Tabuleiro Costeiro de Maceió, período 1972-2001. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, RS, v. 12, n.1, p. 131-141, 2004.
- WILLMOTT, C. J. On the Validation of Models. **Physical Geography**, 2(2), 184-194, 1981.

### REFERENCIAÇÃO

KRIEGER, J. M.; VIEIRA, I. S.; SILVA, W. O. A.; SOUZA, J. L.; LYRA, G. B. Balanço de radiação utilizando métodos de estimativa da radiação solar em cultivo de cana-de-açúcar. **Agrometeoros**, Passo Fundo, v.27, n.1, p.123-133, set 2019.

Declaração: os trabalhos estão sendo publicados nesse número de AGROMETEOROS (v.27, n.1, set 2019) conforme foram aceitos pelo XXI Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, realizado de 12 a 16 de agosto de 2019, em Catalão, Goiás, sem revisão editorial adicional da revista.



# Radiation balance using methods of global solar radiation estimation in sugar cane crop

Joana Madeira Krieger<sup>1</sup>, Isabella Siqueira Vieira<sup>1</sup>, Wellerson de Oliveira Alves da Silva<sup>1</sup>, José Leonaldo de Souza<sup>2</sup>,  
Guilherme Bastos Lyra<sup>2</sup> and Gustavo Bastos Lyra<sup>1(\*)</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Rodovia BR 465, km 07, s/n, Zona Rural, CEP 23890-000 Seropédica, RJ, Brazil.

E-mails: joanakrieger@gmail.com, isasv9@gmail.com, wellersondeoliveiraalvessilva@gmail.com and gblyra@ufrj.com.br

<sup>2</sup>Universidade Federal de Alagoas, Centro de Ciências Agrárias de Alagoas – CECA. Rodovia BR104, km 85, s/n, Mata do Rolo, CEP 57.100-000 Rio Largo, AL, Brazil. E-mails: leonaldojs@yahoo.com.br and gbastoslyra@gmail.com

(\*)Corresponding author.

## ARTICLE INFO

### Article history:

Received 26 September 2019

Accepted 4 March 2020

### Index terms:

inverse problems

agrometeorological modeling

linear models

## ABSTRACT

Due to the difficulty of continuous measurement and the quality of radiation balance components there is a need to develop models to estimate them. This work fitted the coefficients of the Hargreaves-Samani (HaS) and Bristow-Campbell (BrC) methods for estimation of global solar radiation ( $R_s$ ), as well as the albedo ( $\alpha$ ) and long wave balance model coefficients ( $R_{nl}$ ) in sugarcane crop in the Rio Largo/AL region. Measurements of the components of the radiation balance ( $R_n$ ) were carried out between 03 and 27/06/2006 by a net radiometer. The coefficients were fitted by inverse problem (Levenberg-Marquardt method). After the optimization of the coefficients, the short-wave ( $R_{ns}$ ) and  $R_{nl}$  models and the  $R_n$  calculated with  $R_s$  estimated by HaS and BrC were compared with observations of these components. The BrC method fitted  $(\beta_0 = 0.478, \beta_1 = 0.016 \text{ e } \beta_2 = 2.78)$  was more accurate than Hargreaves-Samani method ( $k_t = 0.172$ ). The fitted models used to estimate  $R_{ns}$ ,  $R_{nl}$  e  $R_n$  were also accurate in representing the observed data. When the models were used to test the proposed methods, the observed errors were, for the most part, the transfer of errors obtained by the methods for the estimation of  $R_s$ . Model errors, especially of  $R_{nl}$ , have a low impact on  $R_n$ . The values of  $R_n$  estimated using  $R_s$  determined by the BrC method are more accurate than when using the HaS method.

© 2020 SBAgro. All rights reserved.

## CITATION

KRIEGER, J. M.; VIEIRA, I. S.; SILVA, W. O. A.; SOUZA, J. L.; LYRA, G. B. Balanço de radiação utilizando métodos de estimativa da radiação solar em cultivo de cana-de-açúcar. *Agrometeoros*, Passo Fundo, v.27, n.1, p.123-133, set 2019.

Disclaimer: papers are published in this issue of AGROMETEOROS (v. 27, n.1, set 2019) as accepted by the XXI Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, held August 12-16, 2019 in Catalão, Goiás State, Brazil, without further revision by editorial board.