

Coefficientes da equação de Angström-Prescott para a região de Guarapuava-PR

Bruno Patias Lena^{1,*}, Sidney Osmar Jadoski², Cléber Junior Jadoski³, Josiel Francisco Rigo⁴

¹Pós-doutorando do Departamento de Crop, Soil and Environmental Science de Auburn University, Auburn, AL, USA.

²Professor do Departamento de Agronomia da Universidade Estadual do Centro-Oeste, Guarapuava, PR, Brasil.

³Professor da Universidade Católica Dom Bosco, Campo Grande, MS, Brasil.

⁴Bacharel em Agronomia da Universidade Estadual do Centro-Oeste, Guarapuava, PR, Brasil.

*Autor correspondente: bzp0043@auburn.edu

Artigo enviado em 21/06/2019, aceito em 15/01/2020.

RESUMO: A radiação solar global é uma informação importante em estudos climáticos e ambientais e necessária para determinar a evapotranspiração de referência. Esse valor pode ser satisfatoriamente estimado a partir da equação de Angström-Prescott, porém essa equação deve ser ajustada para cada região em específico. O objetivo desse estudo foi ajustar os coeficientes “a e b” da equação de Angström-Prescott para a região de Guarapuava-PR. O estudo foi realizado utilizando dados climáticos fornecidos pela Estação Meteorológica da Unicentro, compreendendo o período de 1984 a 2014. A equação foi ajustada com aplicação de dispersão para dados diários pela razão entre a relação radiação solar global e radiação extraterrestre, e a relação insolação e fotoperíodo. Através de regressão linear foram determinados os coeficientes quinzenais, mensais e anuais. Os coeficientes médios de “a” variaram de 0,145 a 0,227 e “b” de 0,358 a 0,472. Ainda, foi observado que esses valores diferiram daquelas desenvolvidos regiões com classificações climáticas contrastantes, evidenciando a importância da calibração da equação de Angström-Prescott localmente.

Palavras-chave: Energia solar, evapotranspiração de referência, Penman-Monteith.

Coefficients of Angstrom-Prescott's equation for Guarapuava-PR region

ABSTRACT: Solar radiation is an important information for climatic and environmental studies, and it is required to estimative of reference evapotranspiration. This value can be satisfactorily estimated by the Angström-Prescot equation, however, this equation must be developed for each region individually. The objective of this study was to develop the Angström-Prescot equation for the Guarapuava-PR region. The study was performed using meteorological data from the Unicentro Meteorological Station from 1984 to 2014. The equation was obtained using dispersion graphic by the ratio between the relation of solar radiation and extraterrestrial radiation, and the relation insolation and sunshine from daily data. By the linear regression, it was determined the Angström-Prescot equation for 15-days basins, as well as monthly and annually basins. The “a” and “b” coefficients varied from 0.145 and 0.227 and from 0.358 and 0.472, respectively. Moreover, these values differed from those developed in contrasting climate type regions, highlighting the importance of local calibration of Angström-Prescott equations.

Key-words: Solar radiation, reference evapotranspiration, Penman-Monteith.

Introdução

A obtenção de êxito em atividades agrícolas está associada, principalmente, à exatidão das informações utilizadas para auxiliar a tomada de decisões ao longo do processo produtivo. Em produção vegetal uma das informações muito importantes é a radiação solar global, pois esse elemento climático está direta ou indiretamente relacionado aos estudos de balanço hídrico climatológico, determinação de consumo hídrico de cultivos (evapotranspiração), zoneamento agrícola e estudos hidrológicos em geral (Pereira et al., 2002).

A radiação solar global (R_s) é a principal fonte de energia terrestre, atuando diretamente na dinâmica de movimentação de massa e energia. Ainda, a produção de alimentos de origem vegetal depende da disponibilidade de R_s , pois ela fornece energia que é utilizada pelas plantas para realizar todos os processos bioquímicos, principalmente a fotossíntese (Almorox et al. 2008). No entanto, Ångström (1924) em estudo pioneiro, demonstrou que a disponibilidade dessa energia é variável conforme as características climáticas locais, sendo essas condicionadas aos fatores climáticos tais como latitude, altitude, relevo e época do ano. Consequentemente, para estudos em que informações de R_s são utilizados para auxiliar a tomada de decisão na agricultura, é necessário que esse elemento climático seja determinado de maneira confiável e localmente para a região.

Apesar do avanço da tecnologia e da redução do custo com equipamentos microeletrônicos utilizados para determinar valores reais de R_s , ainda é possível observar um número elevado de estudos em que R_s é estimada a partir de modelos matemáticos (Besharat, et al., 2013). Esses modelos têm grande importância na área ciência para usos pontuais, enfatizando a importância desse tipo de estudo. Atualmente, o método mais difundido e internacionalmente aceito é o de Ångström-Prescott (Ångström, 1924;

Prescott, 1940), sendo esse caracterizado pela praticidade, robustez e confiabilidade na estimativa de R_s , sendo a insolação (i) o único input necessário para aplicação do método (WMO, 1986).

A quantidade de R_s que efetivamente chega na superfície terrestre é diferente daquela que atinge o topo da atmosfera, pois a atmosfera funciona como uma “barreira” em que a radiação é refletida, absorvida ou difundida. Ainda, é importante mencionar que a maior ou menor transmissividade da radiação solar estará sujeita às características climáticas de cada região. Por exemplo, regiões em que é observado uma elevada formação de nuvens ao longo do dia apresentarão menor quantidade de energia solar disponível em relação a regiões com céu menos nublado. Devido a tais condições e ao fato de a equação de Angstrom-Prescott utiliza a insolação para estimar R_s , torna-se imprescindível que essa equação seja determinada localmente para cada região.

A equação proposta por Ångström-Prescott (Ångström, 1924; Prescott, 1940) é determinada pela regressão linear entre o índice de claridade, obtida pela relação entre a radiação solar global e a radiação no topo da atmosfera, e a razão de insolação, obtida pela relação entre insolação e fotoperíodo. Matematicamente a equação é expressa pela equação 1, que segue:

$$K = a + b \times k \quad (1)$$

em que:

K – índice de claridade;

a e b – coeficientes linear e angular da equação, respectivamente;

k – índice de insolação.

A partir da equação é possível fazer algumas considerações. Em dias totalmente nublado a insolação tenderá a zero ($i \rightarrow 0$, ou seja, $r \rightarrow 0$ e $b \rightarrow 0$), fazendo com que o K seja representado pelo valor do coeficiente a . Consequentemente, é possível afirmar que o coeficiente linear da equação representa a fração difusa da radiação solar. Em contrapartida, o coeficiente angular (b) define a maior ou menor transmissividade da luz solar (fração direta) que passa pela

atmosfera, sendo esse dependente, principalmente, da maior ou menor presença de nuvens na atmosfera. Assim, quanto maior a somatória de $a+b$, maior é a quantidade de energia solar que consegue atravessar a camada de atmosfera de forma direta ou difusa. Em função disso, tais coeficientes a e b estão intrinsecamente correlacionados aos elementos e fatores climáticos de cada região, tais como a latitude, altitude, época do ano e condições climáticas locais predominantes.

Allen et al. (1998) sugerem os valores de $a=0,25$ e $b=0,5$ para regiões com ausência desses determinados *in loco*, entretanto, estudos demonstraram que estes valores sugeridos meramente tendem à média e apresentam expressiva variabilidade entre locais. Dornelas et al. (2006), utilizando uma série histórica de 25 anos de dados, encontraram valores de a e b de 0,278 e 0,49, respectivamente, para a região de Brasília-DF. Para Palotina-PR na região Sul do Brasil, Dallacort et al. (2004) observaram valores mensais de a variando de 0,160 a 0,230 e de b entre 0,328 e 0,488. Na região Nordeste do Brasil, Medeiros et al. (2017) encontraram $a=0,29$ e $b=0,41$ para Natal-RN, $a=0,39$ e $b=0,29$ para Macau-RN, $a=0,34$ e $b=0,41$ para Apodi-RN e $a=0,36$ e $b=0,38$ para Caicó-RN. Além desses, ainda é possível encontrar uma grande quantidade de trabalhos desenvolvidos para determinar esses coeficientes tanto no território nacional (Blanco e Sentelhas, 2002; Carvalho et al., 2011; Buriol et al., 2012; Andrade Júnior et al., 2012; Silva, 2014; Belúcio et al., 2014), quando no território internacional (Almorox et al., 2005; Liu et al., 2009a; Manjnooni-Heris e Bahadori, 2014). Ainda, em um estudo onde a evapotranspiração de referência calculada a partir de R_s estimado pelos coeficientes propostos por Allen et al. (1998) foi comparada aqueles obtidos para 36 localidades, Liu et al. (2009b) observaram que, além do coeficiente a ter sido 5-55% menor e b 2-38% maior do que as recomendações de a e b por Allen et al. (1998), esses foram suficientes para obter

uma variação na evapotranspiração de referência de -3% a 15%. Considerando que a evapotranspiração de referência é uma informação utilizada para realizar o manejo de irrigação, a lâmina de irrigação poderia ser sub ou superestimada. Esses resultados reforçam a importância da obtenção dos coeficientes da equação de Ångström-PreScott localmente, permitindo a adequada estimativa da R_s .

Para a região de Guarapuava-PR, esses coeficientes ainda não foram obtidos. Na ausência desses valores, uma das alternativas seria utilizar método sugerido por Allen et al. (1998), no entanto, Liu et al. (2009b) demonstraram que esse método pode comprometer as estimativas da evapotranspiração. Ainda, outra alternativa seria utilizar aqueles obtidos de regiões próximas e com classificação climática similar à de Guarapuava-PR, como por exemplo em Palotina-PR (Dallacort et al., 2004). Entretanto, Paulescu et al. (2016) verificaram que a altitude é um dos principais fatores associados com a variabilidade dos coeficientes a e b da equação de Ångström-PreScott. Enquanto Palotina se encontra a 365 m de altitude, Guarapuava encontra-se a cerca de 1100 m de altitude, o que criaria incertezas sobre a utilização desses coeficientes devido à elevada discrepância de altitude entre as cidades. Com base no exposto acima, este trabalho teve como objetivo determinar os coeficientes a e b da equação de Ångström-PreScott para a região de Guarapuava-PR a partir de uma série histórica de 31 anos de dados climáticos locais.

Material e Métodos

O estudo foi realizado utilizando as informações do banco de dados da Estação Meteorológica de Guarapuava-PR (CODIGO: 02551010) localizada no Campus CEDETEG, da Universidade Estadual do Centro-Oeste (UNICENTRO). A estação encontra-se localizada nas coordenadas geográficas 25°23'05" S e 51°29'37" O e 1034 m de altitude. O clima da região é

considerado do tipo Cfb conforme classificação de Köppen-Geiger (1928), com clima temperado, sem estação de seca definida, temperatura média no mês mais frio de 12,7 °C (julho) e de 20,9 °C mês mais quente (janeiro) e precipitação acumulada anual média de 1895,2 mm.

A determinação da equação de Ångström-Prescott foi realizada utilizando dados diários compreendidos entre o dia 1° de janeiro de 1984 e 31 de dezembro de 2014, totalizando uma série histórica 31 anos. O coeficiente a e b de Ångström-Prescott foram estimados a partir da equação 2 (Ångström, 1924; Prescott, 1940), que segue:

$$\frac{R_s}{R_a} = a + b \times \left(\frac{i}{N}\right) \quad (2)$$

em que R_s é a radiação solar global ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), R_a é a radiação solar extraterrestre ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), i é insolação (horas) e N é o fotoperíodo (horas).

Enquanto R_s e i foram obtidos utilizando registros do actinógrafo e o heliógrafo, respectivamente, os valores de R_a e N foram calculados conforme as equações 3, 4, 5 e 6, que seguem:

$$R_a = 37,6 * \left\{ \left[1 + 0,033 * \cos\left(\frac{360 * DJ}{365}\right) \right] * \left[\left(\frac{\pi}{180}\right) * AHNS * \sin \theta * \sin \delta + \cos \theta * \cos \delta * \sin AHNS \right] \right\} \quad (3)$$

$$N = \frac{2}{15} * \arccos(-tg \theta * tg \delta) \quad (4)$$

$$AHNS = \arccos(-tg \theta * tg \delta) \quad (5)$$

$$\delta = 23,45 * \sin\left(\frac{360 * (80 - DJ)}{365}\right) \quad (6)$$

em que DJ é o dia juliano (de 1 a 365, ou 366 para ano bissexto), AHNS é o ângulo horário

ao nascer do sol ($^{\circ}$), θ é a latitude do local ($-24,35^{\circ}$) e δ é a declinação solar ($^{\circ}$).

Os coeficientes a e b foram estimados a partir de regressão linear dispostos em gráfico de dispersão, em que no eixo “y” foi plotado a relação entre R_s/R_a e no eixo “x” a relação entre i/N . Os coeficientes foram obtidos para as escalas anual, e para cada mês do ano em escala mensal e quinzenal.

Com o intuito de avaliar o desempenho das equações geradas, foram realizados testes de validação de cada equação individualmente. A validação foi realizada com dados climáticos do período entre o dia 1° de janeiro de 2015 a 31 de dezembro de 2017. Foram comparados dados diários de R_s real, e R_s estimada, utilizando as escalas anual, mensal e quinzenal.

As equações geradas foram analisadas conforme o coeficiente de determinação (R^2). Na análise de validação das equações, os valores estimados foram confrontados com os valores reais conforme índice de concordância (d) proposto por Willmott (1981) e Willmott et al. (2012), o coeficiente de correlação (r) e o índice de confiança (c) proposto por Camargo e Sentelhas (1997). O índice d indica a exatidão dos valores calculados pelo modelo com relação aos dados reais, sendo mais exato o modelo quando $d \rightarrow 1$. Ainda, a interpretação de r e c são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Níveis de classificação conforme o valor do coeficiente de correlação e índice de confiança.

Coeficiente de correção (r)		Índice de confiança (c)	
Valor	Desempenho	Valor	Desempenho
0,000 – 0,199	Correlação bem fraca	$\leq 0,400$	Péssimo
0,200 – 0,399	Correlação fraca	0,401 – 0,500	Mau
0,400 – 0,699	Correlação moderada	0,501 – 0,600	Sofrível
0,700 – 0,899	Correlação forte	0,601 – 0,650	Mediano
0,900 – 1,000	Correlação muito forte	0,651 – 0,750	Bom
		0,751 – 0,850	Muito Bom
		$> 0,850$	Ótimo

Resultados e Discussão

Na Figura 1 é apresentado a precipitação acumulada média mensal para Guarapuava-PR obtidos a partir de dados históricos de 1984 a 2017. É possível observar que a região é caracterizada por apresentar um elevado volume de precipitação anual e bem distribuído ao longo do ano, evidenciando a ausência de

período de seca definida. Os meses com maior e menor volume de precipitação são janeiro com 211,9 mm, e agosto com 99,2 mm, respectivamente. Em termos médios é observado ocorrência de 143 dias com chuva ao longo do ano (representando aproximadamente 40% dos dias do ano), com média de 8 dias de chuva em agosto a 16 dias em janeiro.

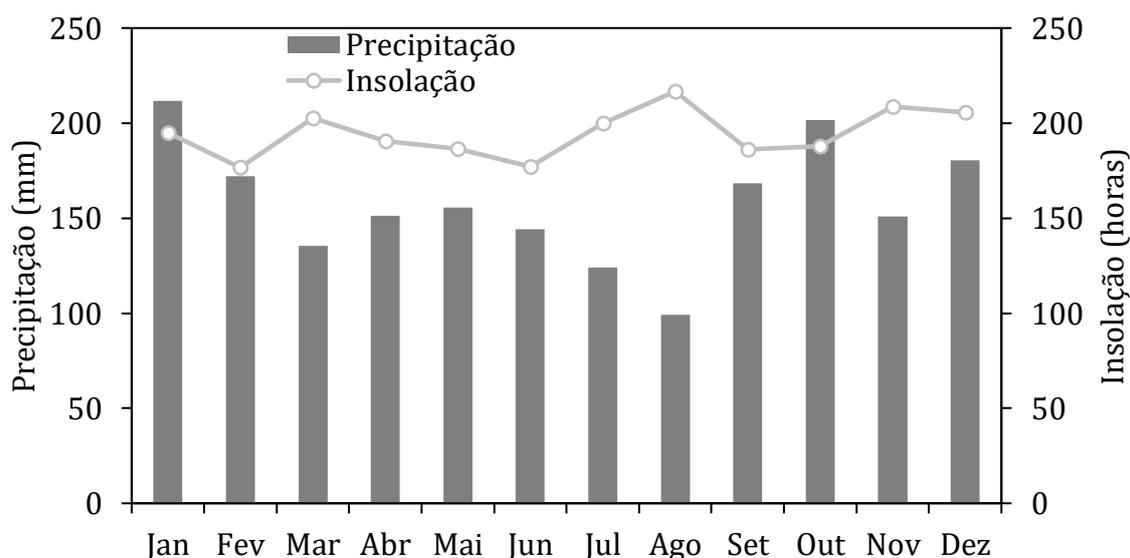


Figura 1. Média histórica mensal de precipitação acumulada e insolação para Guarapuava-PR.

A insolação é uma variável meteorológica muito influenciada pela presença ou ausência de nuvens, podendo ser parcialmente relacionada à precipitação. Verificou-se que em Guarapuava o total de insolação média anual é de 2333 horas, representando cerca de 53% do total horas máximas de brilho solar possível no ano (4380 horas). O menor valor de i é observado em fevereiro, com 176,6 horas, valor esse muito similar a junho, que apresenta i média de 177,1 horas (Figura 1). Em contrapartida, agosto é o mês em que i é máximo com média de 216,6 horas, coincidindo com o mês de menor precipitação acumulada observada. É possível afirmar que, devido a boa distribuição de precipitação acumulada mensal ao longo do ano, a variabilidade de i é baixa (média de $194,4 \pm 12,6$ horas).

Em um estudo realizado para determinar os coeficientes a e b para a região de Macapá-AP, Belúcio et al. (2014) observaram que em outubro, mês com menor precipitação média (40 mm), i foi de 285 horas, em março foi observado o menor valor de i , com média de 194 horas, coincidindo com o mês de maior precipitação acumulada observada (420 mm), sendo a média de i igual a $195,7 \pm 59,3$ horas. Apesar de valor médio de i para ambas as regiões terem sido muito similares, a variabilidade foi muito maior para Macapá quando comparado à Guarapuava. Esses resultados sugerem que a insolação é influenciada pela quantidade de precipitação acumulada mensal. Além disso, Macapá é considerada uma região época de seca bem definida entre agosto e novembro (Köppen-Geiger, 1928; Belúcio et al., 2014), o que explica a variabilidade da

insolação ao longo do ano para essa região ($\pm 59,3$ horas), diferente do que foi observado para Guarapuava ($\pm 12,6$ horas).

Na Figura 2 é apresentado a correlação entre a precipitação e a insolação acumulada considerando valores mensais (A) e anuais (B). Em ambos os casos foi observada uma correlação negativa, ou seja, o aumento do volume total de precipitação foi simultaneamente acompanhado de diminuição da insolação. O coeficiente de determinação para a correlação mensal e anual foi de 0,417 e 0,628, respectivamente, apresentado uma correlação abaixo da faixa considerada ideal. No entanto, é importante mencionar que essa baixa correlação era esperada devido a insolação ocorrer no período diurno e a precipitação ser em período integral. Neste caso, considerando um dia em que a precipitação ocorre somente no período noturno seguido de um período diurno com céu aberto, a insolação será máxima, ou seja, a precipitação não irá causar uma diminuição do valor da insolação. Ainda, outra causa associada ao baixo valor observado é que em dias completamente nublados, porém sem precipitação, a insolação será baixa. Essas

duas situações foram observadas ao longo do período analisado, podendo ser utilizadas para explicar, parcialmente, os baixos valores de coeficiente de determinação entre precipitação e insolação.

Na Figura 3 é apresentado a distribuição da série histórica da relação entre R_s/R_a e i/N utilizada para gerar a equação de Angström-Prescott para a região de Guarapuava-PR. Embora haja uma variabilidade entre os resultados, nota-se uma relação linear entre os valores apresentados. O coeficiente R^2 para a série histórica de dados foi 0,8195, valor esse dentro daquele considerado adequado para esse tipo de estudo (Goldberg, 1991). Os valores anuais de a e b foram, respectivamente, 26,6% e 15,5% menores do que aqueles propostos por Allen et al. (1998) ($a=0,25$ e $b=0,50$). A discrepância entre os valores apresentados por esses autores e os observados para Guarapuava reafirmam a importância de determinação de a e b localmente, sendo esses imprescindíveis para uma estimativa da radiação solar global mais precisa e confiável para a região.

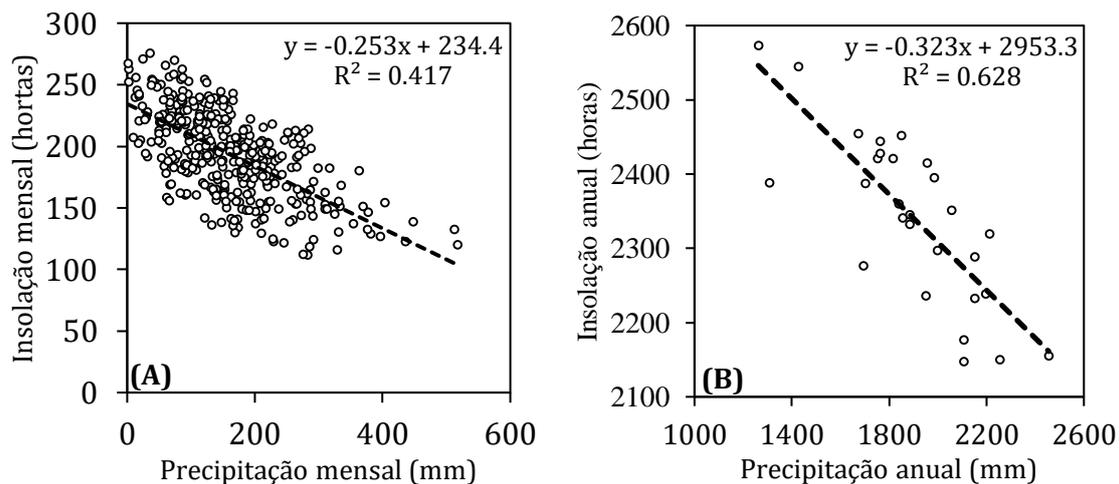


Figura 2. Correlação entre a precipitação acumulada mensal e insolação acumulada mensal nas escalas mensal (A) e anual (B).

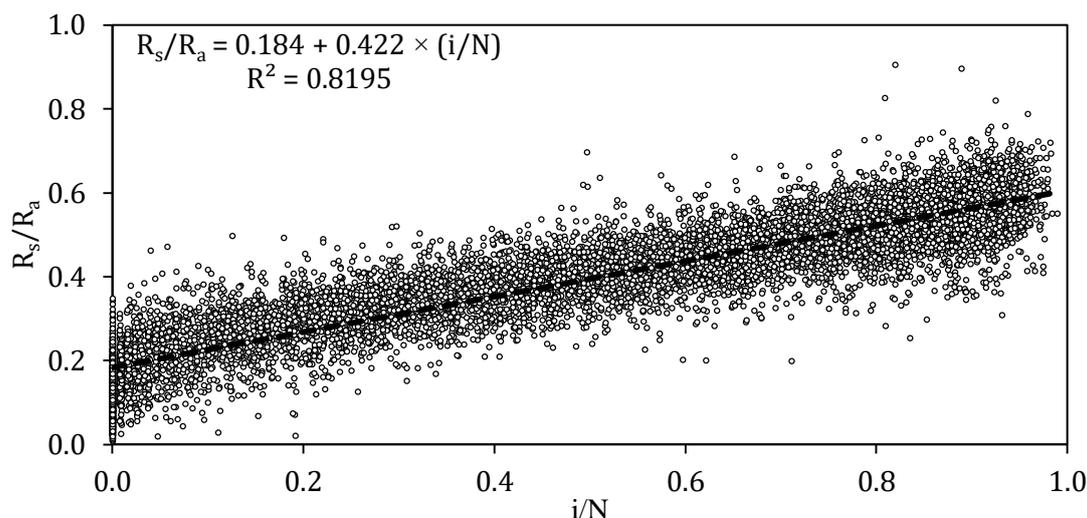


Figura 3. Valores diários da razão entre radiação solar global e extraterrestre (R_s/R_a) e a razão entre a insolação e fotoperíodo (i/N) entre os dias de 01/01/1984 e 31/12/2014 na região de Guarapuava-PR.

O valor da somatória de a e b para toda a série de dados utilizada foi de 0,606. Esse valor indica que, em dias completamente claros (em que $i/N = 1$), somente 60,6% da radiação solar que atinge o topo da atmosfera (R_a) chega até a superfície (R_s), sendo o restante absorvido, refletido ou difundido pelos gases e partículas em suspensão presentes na atmosfera. Devido à grande quantidade e boa distribuição da precipitação na região, é evidente a influência dessas características na redução da energia solar disponível. Comparando esse valor com aqueles obtidos por Medeiros et al. (2017) para três regiões semiáridas do Rio Grande do Norte, é possível observar um aumento na somatória de a e b , sendo de 0,68, 0,74 e 0,75 para Macau-RN, Caicó-RN e Apodi-RN, respectivamente. Esses resultados podem ser parcialmente explicados devido a menor precipitação acumulada anual (893, 648 e 507 mm, respectivamente), refletindo em uma atmosfera com menor presença de vapor de água e, conseqüentemente, menor atenuação da radiação solar total no ano. Enquanto que para Guarapuava i é igual a 2563 horas, para Macau-RN, Caicó-RN e Apodi-RN os valores são de 2686, 2700 e 3041 horas, respectivamente.

Os coeficientes da equação de Ångström-Prezcott ajustados bem como o R^2 , estão sumarizados na Tabela 2. O coeficiente a variou de 0,145 (agosto) a 0,227 (fevereiro) e b de 0,358 (fevereiro) à 0,472 (setembro). Esses resultados foram semelhantes aos apresentados por Dallacort et al. (2004) para Palotina-PR, em que a variou de 0,160 (inverno) a 0,230 (verão) e b de 0,328 (verão) e 0,488 (inverno), além da dinâmica de variação de ambos os coeficientes durante o ano. Apesar da diferença de altitude entre Guarapuava-PR (1034 m) e Palotina-PR (365 m), fator que poderia causar uma diferença nos valores de a e b , é possível afirmar que o efeito combinado de boa distribuição mensal de precipitação ao longo do ano e a ausência um período de seca definido para ambos os locais (IAPAR, 2018) tiveram uma influência mais pronunciada nos resultados de a e b .

Quando os valores mensais de a e b apresentados na Tabela 2 são confrontados com regiões distintas à de Guarapuava-PR é verificado que os maiores e menores valores de a e b não necessariamente coincidirão com as mesmas épocas do ano. Por exemplo, em Brasília-DF, Dornelas et al. (2006) encontraram maiores valores de a em julho e menor em outubro, enquanto b

foi maior em setembro e menor em janeiro. Em contrapartida, em Macapá-AP foi observado o oposto, sendo os menores valores de a em abril e maio e maior em outubro, além dos coeficientes b serem maior em maio e menor em outubro (Andrade Júnior et al., 2012). Essa análise permite afirmar que não é possível pré-definir como será a dinâmica de variação de a e b ao longo do ano somente conforme as

características pluviométricas da região estudada, principalmente se ela apresenta ou não uma estação de seca bem definida. É importante enfatizar que esses coeficientes estão condicionados, também, à latitude, à altitude, à continentalidade e ao relevo da região, o que torna ainda mais importante que esse estudo seja realizado para cada região em específico.

Tabela 2. Valores mensais dos coeficientes a e b Angström-Prescott e coeficiente de determinação (R^2) para a região de Guarapuava-PR.

Mês	a	b	R^2
Janeiro	0.216	0.377	0.790
Fevereiro	0.227	0.358	0.824
Março	0.197	0.400	0.841
Abril	0.186	0.416	0.805
Mai	0.177	0.439	0.816
Junho	0.170	0.439	0.795
Julho	0.160	0.439	0.814
Agosto	0.145	0.445	0.934
Setembro	0.147	0.472	0.869
Outubro	0.163	0.461	0.843
Novembro	0.200	0.417	0.849
Dezembro	0.210	0.396	0.836
Annual	0.184	0.422	0.820

Ainda é possível observar na Tabela 2 uma redução de a entre meados do verão e meados do inverno, sendo que essa situação se inverteu entre o inverno e o verão, sendo caracterizado por um acréscimo dos valores de a nesse período. Essa dinâmica de variação foi similar ao coeficiente b, porém de maneira inversa, ou seja, b teve um acréscimo entre o verão e inverno seguido de uma queda entre inverno verão. Segundo Blanco & Sentelhas (2002), em dias completamente nublados, espera-se valores de a maior no período chuvoso (verão) e menor no período seco (inverno), ou seja, podendo afirmar que existe uma maior transmissividade da energia solar pela atmosfera no período chuvoso. Isso é explicado pelo fato de que na época de chuva ocorre uma maior remoção das partículas sólidas em suspensão causadoras de absorção e reflexão da energia solar (inverso da

transmissividade) quando comparado a época de seca.

Na Tabela 3 é apresentado a sumarização dos valores de a, b e a somatória de a+b para algumas regiões localizadas dentro do território brasileiro. É possível observar que Guarapuava-PR e Palotina-PR apresentaram menores valores de a+b quando comparados aos demais localidades. Enquanto que para ambas regiões a+b foi de 0,605 e 0,604, respectivamente, para as demais regiões os valores variaram de 0,684 para Macapá-AP até 0,762 para Brasília-DF. Coincidentemente, Guarapuava-PR e Palotina-PR não apresentam estação de seca definida, ou seja, há uma maior uniformidade de formação de nuvens de chuvas ao longo do ano, fazendo com que ocorra maior reflexão e absorção dos energia solar, reduzindo a quantidade que efetivamente atinge a superfície. Apesar da

latitude ser considerada um dos principais motivos para a variação desses coeficientes, isto não foi verificado. Por exemplo, Seropédica-RJ se encontra a somente 1,35°

de diferença com relação a Palotina-PR, porém a somatória de a+b foi cerca de 20% maior.

Tabela 3. Valores dos coeficientes a e b da equação de Ångström-Prescott para algumas localidades no território nacional.

Cidade	Latitude (°)	Altitude (m)	Precipitação acumulada anual (mm)	a médio	b médio	a+b médio	Classificação climática ¹	Estação de seca definida
Guarapuava-PR	25.38° S	1034	1938	0.183	0.422	0.605	Cfb	Não
Palotina-PR ²	24.30° S	365	1642	0.188	0.416	0.604	Cfa	Não
Seropédica-RJ ³	22.75° S	30	1213	0.273	0.457	0.730	Aw	Sim
Brasília-DF ⁴	15.93° S	997	1360	0.294	0.468	0.762	Cwa	Sim
Macapá-AP ⁵	00.03° N	16	2487	0.308	0.377	0.684	Am	Sim
Caicó-RN ⁶	06.47° S	169	648	0.353	0.388	0.740	Aw	Sim

¹Conforme a classificação de Köppen-Geiger (Kottek et al. 2006). ²Dallacort et al. (2004). ³Carvalho et al. (2011). ⁴Dornelas et al. (2006). ⁵Belúcio et al. (2014). ⁶Medeiros et al. (2017)

Também é possível observar na Tabela 3 um acréscimo nos valores do coeficiente a conforme à proximidade da linha do equador (com exceção de Caicó-RN), mostrando a maior participação da luz difusa no total de energia solar disponível para a região. Na condição de Caicó-RN, o valor de "a" foi mais elevado, sendo de 0,358. Esse fato pode ser, em parte, explicado pelo fato desta ser a única região semiárida entre as demais avaliadas, e o tipo característico de nuvens, em geral menos espessas e carregadas, permitir a maior transmissividade da luz solar. Apesar da dificuldade de se estabelecer um único fator para explicar a variação de a e b para cada região, aquele que mais se destacou foi a presença ou ausência de um período de seca ao longo do ano, reafirmando a importância da determinação da equação de Ångström-Prescott localmente.

As avaliações de a e b também foram realizadas na escala quinzenal, sendo os resultados apresentados na Tabela 4. Os valores observados para as médias quinzenais foram muito similares às mensais, variando de 0,142 (2ª quinzena de agosto) a 0,230 (2ª quinzena de fevereiro) para o coeficiente "a" e de 0,351 (2ª quinzena de fevereiro) a 0,483 (2ª quinzena de setembro) para o coeficiente "b", indicando que a energia solar chega em

maior escala na superfície terrestre na 2ª quinzena de fevereiro e em menor escala na 2ª quinzena do mês de agosto.

Os resultados de R² apresentados na escala mensal e anual (Tabela 2) e quinzenal (Tabela 4) demonstram que os modelos gerados podem ser utilizados para a estimativa de R_s devido à proximidade à 1. Na escala anual R² foi de 0,82, sendo que na escala mensal R² variou de 0,79 (janeiro) a 0,934 (agosto). Ainda, para a escala quinzenal os maiores e menores valores de R² foi 0,766 (1ª quinzena de janeiro) e 0,882 (2ª quinzena de setembro), respectivamente. Esses resultados foram expressivamente superiores aqueles apresentados por Belúcio et al. (2014) para a Macapá-AP, em que R² variou de 0,23 (setembro) a 0,67 (janeiro). Ainda segundo esses autores, o baixo desempenho dos modelos propostos é explicado pelo baixo volume de informação utilizado (entre janeiro de 2006 a dezembro de 2012). Na literatura é possível observar uma grande variabilidade de valores de R² para a equação de Ångström-Prescott, variando de 0,77 a 0,89 entre as 34 localidades avaliadas no território chinês (Liu et al., 2009b), de 0,58 a 0,82 para 4 cidades no Rio Grande do Norte (Medeiros et al., 2017) e de 0,81 para Brasília-DF (Dornelas et al., 2006).

Tabela 4. Valores quinzenais dos coeficientes a e b Angström-PreScott e coeficiente de determinação (R^2) para a região de Guarapuava-PR.

Mês	Quinzena	a	b	R^2
Jan	1 ^a	0.220	0.369	0.766
	2 ^a	0.213	0.384	0.812
Feb	1 ^a	0.226	0.363	0.844
	2 ^a	0.230	0.351	0.798
Mar	1 ^a	0.203	0.385	0.826
	2 ^a	0.193	0.413	0.854
Apr	1 ^a	0.191	0.409	0.809
	2 ^a	0.183	0.422	0.803
May	1 ^a	0.178	0.443	0.844
	2 ^a	0.176	0.436	0.793
Jun	1 ^a	0.161	0.453	0.801
	2 ^a	0.177	0.425	0.791
Jul	1 ^a	0.172	0.436	0.810
	2 ^a	0.148	0.442	0.823
Aug	1 ^a	0.148	0.450	0.821
	2 ^a	0.142	0.441	0.848
Sep	1 ^a	0.146	0.464	0.857
	2 ^a	0.148	0.483	0.882
Oct	1 ^a	0.162	0.464	0.823
	2 ^a	0.163	0.459	0.862
Nov	1 ^a	0.200	0.417	0.856
	2 ^a	0.200	0.417	0.840
Dec	1 ^a	0.202	0.404	0.837
	2 ^a	0.217	0.388	0.836

Os resultados da validação dos modelos propostos estão descritos na Figura 4 e Tabela 5. É possível observar que os modelos nas escalas anual (Figura 4A), mensal (Figura 4B) e quinzenal (Figura 4C) apresentaram elevado R^2 (variando de 0,852 a 0,862), indicando que os modelos podem ser satisfatoriamente utilizados para estimativas de R_s na Região de Guarapuava. Esses resultados foram superiores àqueles apresentados por Dornelas et al. (2006) para Brasília-DF, em que R^2 foi 0,76 e 0,764 nas escalas anual e mensal, respectivamente, e muito parecidos com aqueles apresentados por Medeiros et al. (2017) para 4 cidades no Rio Grande do Norte, em que R^2 variou de 0,8 para Apodi-RN e 0,9 para Natal-RN ambos para a escala anual.

Os valores de r para os períodos anual, mensal e quinzenal demonstram que as estimativas dos modelos têm uma correlação muito forte com os valores reais (Tabela 5). Ainda, a proximidade do índice d à 1 para todos os períodos corrobora para confirmar a elevada exatidão dos modelos para todos os períodos propostos. Os valores do índice c foram acima de 0,85 para todos os períodos analisados, sendo, portanto, classificados como ótimo (Camargo & Sentelhas, 1997). Os resultados da validação do modelo demonstram que esses podem ser utilizados para estimativa de R_s para Guarapuava com adequada precisão.

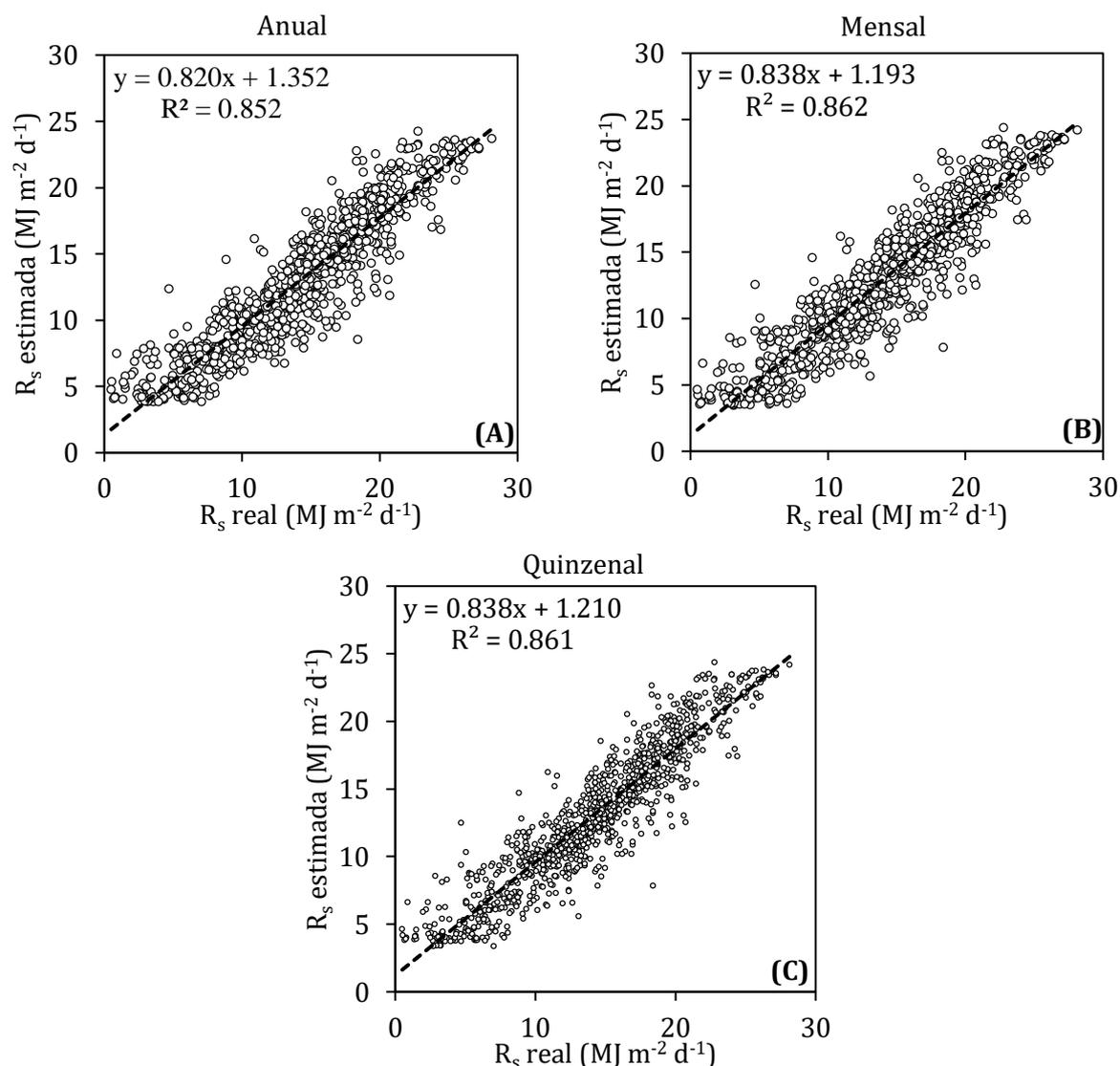


Figura 4. Comparação entre os valores de radiação solar global real (R_s real) medido pelo heliógrafo e estimada (R_s estimada) pela equação de Ångström-Prešcott para os períodos anual (A), mensal (B) e quinzenal (C).

Tabela 5. Resultados de coeficiente de determinação (R^2), coeficiente de correlação (r), índice de concordância (d) e índice de confiança (c) para as escalas anual, mensal e quinzenal para a região de Guarapuava-PR.

Escala	R^2	r	d	c
Anual	0.852	0.923	0.963	0.889
Mensal	0.862	0.928	0.963	0.894
Quinzenal	0.861	0.928	0.962	0.893

Quando esses resultados são confrontados com aqueles disponíveis na literatura, é possível afirmar que as equações de Ångström-Prešcott são determinadas com uma quantidade elevada de informações (por exemplo acima de 25 anos) tendem a apresentar elevado R^2 e índices de desempenho satisfatório

(Dornelas et al., 2006) quando comparados aqueles estudos que foram realizados com uma série histórica menor ou igual a 10 anos (Carvalho et al., 2011; Belúcio et al., 2014). Esses resultados ressaltam a importância da determinação e validação da equação Ångström-Prešcott utilizando uma série histórica adequada.

Conclusões

Os coeficientes a e b da equação de Ångström-Prescott para Guarapuava-PR tiveram uma variabilidade ao longo do ano, sendo a média anual de $a=0,184$ e $b=0,422$, apresentando um coeficiente de determinação de 0,82. A variação dos coeficientes a e b nas escalas mensais e quinzenais foram similares às médias anuais, sendo essa explicada devido ao efeito combinado de elevada quantidade e boa distribuição pluviométrica apresentada na região.

O teste de validação para todos os períodos avaliados resultou em um coeficiente de determinação foi acima de 0,852 e o índice de concordância acima de 0,962, sendo o índice de desempenho com base no coeficiente de correlação e confiança classificados como muito forte e ótimo, respectivamente. Assim, as equações propostas apresentaram elevada precisão, exatidão e acurácia, o que permite serem utilizadas para estimar a radiação solar global satisfatoriamente.

Agradecimentos

Agradecemos a Universidade Estadual do Centro-Oeste pela estrutura física e aos servidores da Universidade, e em especial pelo Instituto Agrônomo do Paraná pelo fornecimento das informações de dados meteorológicos utilizados nesse estudo.

Referências bibliográficas

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).

ALMOROX, J.; BENITO, M.; HONTORIA, C. Estimation of global solar radiation in Venezuela. **Interciencia**, v.33, n.4, p.280-283, 2008.

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

ANDRADE JÚNIOR, A.S.; NOLETO, D.H.; SILVA, M.E.; BRAGA, D.L.; BASTOS, E.A. Coeficientes da equação de Ångström-Prescott para Parnaíba, Piauí. **Comunicata Scientiae**, v.3, n.1, p.50-54, 2012.

ÅNGSTRÖM, A. Solar and atmospheric radiation. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 50, p. 121-126, 1924.

BELÚCIO, L.P.; SILVA, A.P.N.; SOUZA, L.R.; MOURA, G.B.A. Radiação solar global estimada a partir da insolação para Macapá (AP). **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.29, n.4, p.494-504, 2014.

BESHARAT, F.; DEGHAN, A.A.; FAGHIH, A.R. Empirical models for estimating global solar radiation: A review and case study. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.21, p.798-821, 2013.

BLANCO, F. F.; SENTELHAS, P. C. Coeficientes da equação de Ångström-Prescott para estimativa da insolação para Piracicaba, SP. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.10, p.295-300, 2002.

BURIOL, G.A.; ESTEFANEL, V.; HELDWEIN, A.B.; PRESTES, S.D.; HORN, J.F.C. Estimativa da radiação solar global a partir dos dados de insolação, para Santa Maria – RS. **Ciência Rural**, v.42, n.9, p.1563-1567, 2012.

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.5, p.89-97, 1997.

CARVALHO, D.F.; SILVA, D.G.; SOUZA, A.P.; GOMES, D.P.; ROCHA, H.S. Coeficientes da

equação de Angström-Prescott e sua influência na evapotranspiração de referência em Seropédica, RJ. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.8, p.838-844, 2011.

DALLACORT, R.; FREITAS, O.S.L.; GONÇALVES, A.C.A.; REZENDE, R.; BERTONHA, A.; SILVA, F.F.; TRINTINALHA, M. Determinação dos coeficientes da equação de Angstron para a região de Palotina, Estado do Paraná. *Acta Scientiarum. Agronomy*, v.26, n.3, p.329-336, 2004.

DORNELAS, K. D. E S.; SILVA, C. L. DA; OLIVEIRA, C. A. da S. Coeficientes médios da equação de Angström-Prescott, radiação solar e evapotranspiração de referência em Brasília. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.41, p.1213- 1219, 2006.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. **The state of the world's land and water resources for food and agriculture (SOLAW) – Managing systems at risk**. FAO: Roma, 2011. 285 p.

GOLDBERG, A. S. A Course in Econometrics. Cambridge, Mass: Harvard University, Press, 1991.

IAPAR. Instituto Agrônomo do Paraná.

Tabela de precipitação média histórica.

Disponível em:

<http://www.iapar.br/arquivos/Image/monitoramento/Medias_Historicas/Palotina.htm>. Acesso em: 19 Julho 2018.

KÖPPEN, W.; GEIGER, R. *Klimate der Erde*. Gotha: Verlag Justus Perthes. 1928. Wall-map 150cmx200cm.

LIU, X.; MEI, X.; LI, Y.; WANG, Q.; ZHANG, Y.; PORTER, J. R. Variation in reference crop evapotranspiration caused by the Angström-Prescott coefficient: Locally calibrated versus the FAO recommended. **Agricultural Water Management**, v.96, p.1137-1145, 2009b.

LIU, X.; MEI, X.; LI, Y.; ZHANG, Y.; WANG, Q.; JENSEN, J. R.; PORTER, J. R. Calibration of the Angström-Prescott coefficients (a, b) under different time scales and their impacts in estimating global solar radiation in the Yellow River basin. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.149, p.696-710, 2009a.

MANJNOONI-HERIS, A.; BAHADORI, H. Calibration of the modified Ångström global solar radiation models for different seasons in South of Iran. **International Journal of Biosciences**, v.4, n.3, p.53-60, 2014.

MEDEIROS, F.J.; SILVA, C.M.S.; BEZERRA, B.G. Calibration of Ångström-Prescott equation to estimate daily solar radiation on Rio Grande do Norte State, Brazil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.32, n.3, p.409-416, 2017.

PAULESCU, M.; STEFU, N.; CALINOIU, D.; PAULESCU, E.; POP, N.; BOATA, R.; MARES, O. Ångström–Prescott equation: Physical basis, empirical models and sensitivity analysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.62, p.495-506, 2016.

PEREIRA, A.R.; ANGELOCCI, LR., SENTELHAS, P.C. *Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas*. Guaíba: **Agropecuária**, 2002. 478 p.

PRESCOTT, J.A. Evaporation from a water surface in relation to solar radiation. **Transactions of the Royal Society of South Australia**, v. 64, p. 114-480, 1940.

SILVA, A.O. Coeficiente de Ångström–Prescott e sua influência na radiação solar e ETo no perímetro irrigado de bebedouro em Petrolina. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**, v.8, n.4, p.333-342, 2014.

WILLMOTT, C. J. On the validation of models. *Physical Geography*, v.2, p.184-194, 1981.

WILLMOTT, C. J.; ROBESON, S. M.; MATSUURA, K. Short Communication: A refined index of model performance. **Intl. Journal of Climate**, v.32, p.2088-2094, 2012.

WMO. World Meteorological Organization. Manual on Estimation of Probable Maximum Precipitation (PMP). Disponível em:
<<http://www.wmo.int/pages/prog/hwrrp/publications/PMP/WMO%201045%20en.pdf>>. Acesso em: 15 Julho 2018.