

AVALIAÇÃO DE EQUAÇÕES NÃO-LINEARES DE ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO GLOBAL EM FUNÇÃO DA RAZÃO DE INSOLAÇÃO PARA SUPERFÍCIES INCLINADAS

Adilson Pacheco de Souza¹; João Francisco Escobedo²

¹ Engenheiro Agrícola, Professor Assistente, Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais, Universidade Federal de Mato Grosso, Campus de Sinop, Av. Alexandre Ferronato 1200, Distrito Industrial, CEP: 78550-000, Sinop-MT, adilsonpacheco@ufmt.br.

² Físico, Prof. Doutor, Depto de Recursos Naturais, UNESP/FCA, Botucatu-SP, escobedo@fca.unesp.br.

Apresentado no XVII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia – 18 a 21 de julho de 2011 SESC Centro de Turismo de Guarapari, Guarapari, ES

RESUMO: Correlacionou-se as frações da radiação global com a radiação no topo da atmosfera com a razão de insolação, por meio de equações não-lineares, para estimativa da radiação global incidente em superfícies inclinadas a 12,85°, 22,85° e 32,85° para o Norte, em Botucatu-SP. Foram avaliados os modelos de Rietveld, Gopinathan e Ogelman et al, que modificaram a forma de obtenção dos coeficientes linear (a) e angular (b) da equação de Angstrom & Prescott. Ainda foi proposto, um modelo que engloba o ângulo de inclinação na obtenção desses coeficientes. Os modelos encontrados na literatura apresentaram espalhamentos acima de 3,5 MJ m⁻² e tendência em subestimar nas superfícies inclinadas. O modelo proposto apresentou as seguintes equações: $a = 0,20426 + 0,00142\beta$ e $b = 0,60342 - 0,00571\beta$, com R² igual a 0,93504, possibilitando que o máximo de radiação incidente decresça com o aumento do ângulo de inclinação. O modelo proposto apresentou um ótimo desempenho para estimativa da radiação global em diferentes superfícies inclinadas com a face para o Norte.

PALAVRAS-CHAVE: Radiação solar, Angstrom & Prescott, índice de claridade.

EVALUATION OF NON-LINEARS EQUATIONS OF ESTIMATES GLOBAL RADIATION IN FUNCTION OF INSOLATION RATIOS IN TILTED SURFACES

ABSTRACT: Used the fractions of global radiation with extraterrestrial radiation in correlation with the insolation ratio, to determine the coefficients linear and angular Angstrom & Prescott model to estimate global radiation incident on horizontal surfaces and inclined to 12.85°, 22.85° and 32.85° to the North, in Botucatu-SP. Evaluated the models Rietveld, Ogelman et al, and Gopoinathan, who changed the way of obtaining the linear (a) and angular (b) coefficients the equation of Angstrom & Prescott. Although it was proposed, a model that incorporates the tilt angle to obtain these coefficients. The models presented in the literature scattering above 3.5 MJ m⁻² and a tendency to underestimate the inclined surfaces. The proposed model presented the following equations: $a = 0,20426 + 0,00142\beta$ and $b = 0,60342 - 0,00571\beta$, with R² equal to 0.93504, thus allowing the maximum of the incident radiation decreases with increasing tilt angle. The proposed model showed an excellent performance for estimating the global radiation on inclined surfaces with different face to the North.

KEYWORDS: Solar radiation, Angstrom & Prescott model, clearness index.

INTRODUÇÃO:

O Brasil, atualmente encontra-se em pleno desenvolvimento tecnológico na área das fontes renováveis de energia tais como: conversão de energia solar térmica e fotovoltaica, biomassa, entre outras. Para locais em que a radiação solar não é monitorada, a solução é utilizar o processo de estimativa através de modelos ou correlações empíricas. As correlações mais importantes e utilizadas com radiação solar são: a primeira chamada de Angstrom, relaciona a fração da radiação global que atinge a superfície terrestre (razão entre radiação global e no topo da atmosfera) com a razão de insolação (número de horas de brilho solar pelo fotoperíodo), e

usa a medida do número de horas de brilho solar para se estimar a radiação global. Para aplicação do método proposto por Angstrom (1924) e modificado por Prescott (1940), normalmente emprega-se a expressão abaixo:

$$\frac{H_G^d}{H_0^d} = a + b\left(\frac{n}{N}\right) \quad (01)$$

Contudo, quando se tem uma superfície inclinada, alguns pontos precisam ser analisados para diminuir os erros de sua aplicação. Dentre esses, se destaca a obtenção do fotoperíodo (N), que segundo Iqbal (1983), deve ser modificado pelo fato do ângulo horário diário para uma superfície inclinada (ω_s') ser dependente da declinação solar, da latitude e da inclinação da superfície, variando ao longo das estações do ano da seguinte maneira: i) Durante o verão (no hemisfério Sul), $\delta < 0$, resultando em $\omega_s > \omega_s'$. Isto significa que os raios solares atingem primeiro a superfície horizontal quando comparada com a superfície inclinada. ii) Durante o inverno (no hemisfério Sul), $\delta > 0$. Matematicamente, resulta-se no fato de que o ângulo horário solar diário para a superfície inclinada seria maior que na superfície horizontal, que fisicamente não acontece. Caso não houvesse essa conotação seriam verificados nas superfícies inclinadas um número maior de horas de fotoperíodo entre os equinócios, quando comparado com a superfície horizontal.

Vários trabalhos vem sendo desenvolvidos nas últimas décadas objetivando melhorar os resultados encontrados nas correlações entre a radiação global e o brilho solar, visto que se tratam de variáveis quantitativas e qualitativas (Rietveld, 1974; Olgeman et al., 1984; Gopinathan, 1988; Akinoglu & Ecevit, 1990; Ertekin & Yaldiz, 2000; Rensheng et al., 2006), entre outros. Para contornar os problemas supracitados e facilitar a aplicação simplificada do modelo de Angstrom & Prescott em superfícies inclinadas, objetivou-se avaliar o comportamento de modelos não lineares para estimativa da radiação global, cujas principais modificações sejam na forma de obtenção dos coeficientes da equação de Angstrom & Prescott, para aplicações em superfícies inclinadas para o Norte, em Botucatu-SP.

MATERIAL E MÉTODOS:

Os dados das irradiâncias global e direta foram coletados na Estação de Radiometria Solar da UNESP de Botucatu-SP (latitude 22°51' Sul, longitude 48°26' Oeste, altitude 786m), no período de abril de 1998 a dezembro de 2007. De acordo com a classificação climática de Köppen, o clima de Botucatu é classificado como Cwa, caracterizado como temperado úmido, com inverno seco e verão quente (Cepagri, 2011). Os valores das irradiâncias globais foram obtidos por piranômetros Eppley-PS, com fator de calibração de 7,45 $\mu\text{V Wm}^{-2}$ e linearidade de $\pm 0,5\%$ (0 a 2800 W/m^2). As leituras foram feitas a cada segundo e as médias armazenadas a cada 5 minutos, em um sistema de aquisição de dados Microllogger Campbell Scientific Inc., modelo CR23X, operando na frequência de 1Hz. Na transferência dos dados foi empregado um módulo de memória SM192 com interface SC532 para microcomputadores e operado pelo software PC 208W da Campbell. Para a irradiância global inclinada, o piranômetro foi posicionado paralelamente sobre planos inclinados de 12,45° ($\langle |L|_{-10^\circ} \rangle$), 22,85° ($\langle |L| \rangle$) e 32,85° ($\langle |L|_{+10^\circ} \rangle$) com a face voltada para o Norte, em diferentes períodos de medidas, porém concomitantes com a horizontal, como segue: entre 09/2001 e 02/2003 para 12,85°; 04/1998 a 08/2001 para 22,85° e entre 03/2003 e 12/2007 para 32,85°. O brilho solar (n) foi medido por um heliógrafo Campbell Stokes e a razão de insolação (r) dada pelo quociente entre (n) e o fotoperíodo (N), que em conjunto com as irradiações diárias no topo da atmosfera horizontal e inclinada foram obtidos segundo Iqbal (1983). Foram avaliados os seguintes modelos de estimativa:

i) Rietveld (1978), denominado RIET:

$$a = a_0 + a_1 \left(\frac{n}{N} \right) \quad (02)$$

$$b = b_0 + b_1 \left(\frac{n}{N} \right) \quad (03)$$

ii) Gopinathan (1988), denominado GOPI:

$$a = a_0 + a_1 \cos \varphi + a_2 h + a_3 \left(\frac{n}{N} \right) \quad (04)$$

$$b = b_0 + b_1 \cos \varphi + b_2 h + b_3 \left(\frac{n}{N} \right)$$

iii) Quadrático, denominado QUAD, semelhante a proposta feita por Ogelman et al (1984):

$$a = a_0 + a_1 \left(\frac{n}{N} \right) + a_2 \left(\frac{n}{N} \right)^2 \quad (05)$$

$$b = b_0 + b_1 \left(\frac{n}{N} \right) + b_2 \left(\frac{n}{N} \right)^2$$

iv) Modelo proposto, denominado MP: na obtenção dos coeficientes seja adicionado o ângulo de inclinação da superfície, com variação entre 0° (horizontal) e 90° (vertical local). Ângulos maiores ou menores que estes indicam outra face de inclinação e necessariamente deve considerar ainda o azimute local.

$$a = a_0 + a_1 \beta \quad (06)$$

$$b = b_0 + b_1 \beta \quad (07)$$

Os valores dos coeficientes foram calculados com dados locais utilizando a plataforma Solver (ferramenta de otimização não-linear de gradiente reduzido genérico) do Microsoft Excel, evitando assim erros que poderiam ser encontrados com os valores apresentados para outras regiões. Na avaliação do desempenho dos modelos supracitados foram empregados os indicativos estatísticos *MBE* (Mean Bias Error), *RMSE* (Root Mean Square Error), e “d” de Willmott (1981), dados por:

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)}{N} \quad RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{N} \right]^{1/2} \quad d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P_i| + |O_i|)^2} \quad (08)$$

em que: P_i - valores estimados; O_i - valores medidos; N - número de observações; $|P_i|$ - valor absoluto da diferença $P_i - \bar{O}_i$; $|O_i|$ - valor absoluto da diferença $O_i - \bar{O}_i$.

RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Na medida em que aumenta o ângulo de inclinação, os modelos avaliados apresentaram piores correlações na estimativa da radiação global inclinada, conforme diminuição dos coeficientes de determinação. Os valores de “ a_2 ” no modelo de Gopinathan (1988) apresentaram-se significativos a 1% de probabilidade, mesmo sendo numericamente pequenos.

O modelo proposto apresentou-se com melhores resultados quando os valores dos coeficientes linear e angular foram dados pelas equações 11 e 12, que propiciaram um coeficiente de determinação geral de 0,93504. Essas equações se limitam a aplicação em superfícies inclinadas para o Norte (quando no Hemisfério Sul) e para ângulos de inclinação variando de 0° (horizontal) a 90° (vertical local), considerando-se sempre com valores positivos. Ângulos de inclinação com valores negativos indicarão outra face de exposição diferenciada da Norte.

$$a = 0,20426 + 0,00142\beta \quad (11)$$

$$b = 0,60342 - 0,00571\beta \quad (12)$$

Tabela 1. Coeficientes dos modelos de RIET, GOPI e QUAD para obtenção dos valores de “a” e “b” da equação de Angstrom & Prescott aplicadas a superfícies inclinadas a 12,85°, 22,85° e 32,85° para o Norte, em Botucatu-SP.

Modelo	Inclinação	Coeficiente linear – “a”				R ^{2*}
		a ₀	a ₁	a ₂	a ₃	
Reitveld (1978)	12,85°	0,17076	-0,04667	-	-	0,93614
	22,85°	0,20234	-0,16630	-	-	0,87876
	32,85°	0,21052	-0,1662	-	-	0,85165
Quadrático	12,85°	0,17542	-0,08776	0,44838	-	0,93640
	22,85°	0,20840	-0,50414	0,52587	-	0,87901
	32,85°	0,21492	-0,19358	0,47758	-	0,85171
Gopinathan (1988)	12,85°	-0,30891	0,53908	-2,15x10 ⁻⁵	0,28988	0,93614
	22,85°	-0,29681	0,55021	-9,99x10 ⁻⁶	0,29617	0,87870
	32,85°	-0,29685	0,55017	-7,95x10 ⁻⁷	0,29564	0,85156
		Coeficiente angular – “b”				
		b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	
Reitveld (1978)	12,85°	0,94105	-0,36052	-	-	-
	22,85°	0,81645	-0,17169	-	-	-
	32,85°	0,81609	-0,21757	-	-	-
Quadrático	12,85°	0,89609	-0,57939	-0,15773	-	-
	22,85°	0,77265	-0,49716	-0,13084	-	-
	32,85°	0,78469	-0,54763	-0,09795	-	-
Gopinathan (1988)	12,85°	1,52688	-1,02711	2,90x10 ⁻⁵	-0,35913	-
	22,85°	1,53307	-1,02140	-3,03x10 ⁻⁴	-0,17138	-
	32,85°	1,53254	-1,02185	-3,01x10 ⁻⁴	-0,21630	-

* Os valores dos coeficientes de determinação (R²) encontrados nas definições do coeficiente linear (a) são os mesmos para o coeficiente angular (b), pois equivale aos valores obtidos da aplicação da equação de Angstrom & Prescott na equação 01.

Fisicamente, a equação de Angstrom & Prescott é dependente dos coeficientes a e b e podem ser entendidos como: quando (n/N) tende a zero, (H_G^d / H_0^d) tende a a , mostrando que a não pode ser maior que 1, pois representa a transmissividade mínima da radiação local. No outro extremo, num dia completamente claro (n/N) tende a 1, e (H_G^d / H_0^d) tende a $a + b$, representando a fração da irradiação extraterrestre incidente na superfície terrestre para dias com céu aberto, ou seja, representa o coeficiente de transmissão atmosférica, ou transmissividade máxima local. Pelo modelo proposto observou-se que a medida que o ângulo de inclinação aumenta a transmissividade mínima (a) também aumenta (Figura 1), todavia o máximo de radiação que atinge a superfície inclinada decresce, com valores máximos e mínimos de 0,80768 e 0,42183 para a horizontal e a 90°, respectivamente.

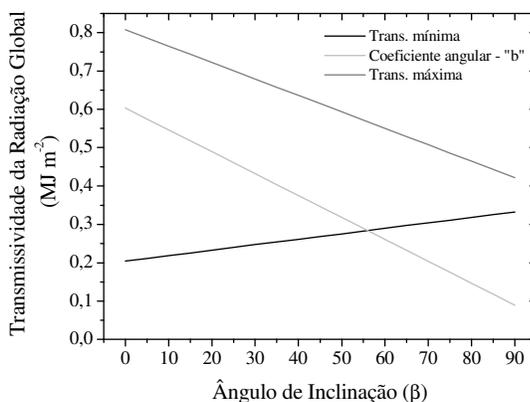


Figura 1. Variação da transmissividade atmosférica em função do ângulo de inclinação.

A Tabela 2 apresenta os valores de MBE e RMSE em termos energéticos e percentuais, em conjunto com o índice de ajustamento de Willmott (1981), indicando que o modelo proposto

apresenta tendência de subestimar os valores da radiação global com o aumento ângulo de inclinação. Os ajustamentos foram superiores a 81,85% nas estimativas por MP. Supit & Van Kappel (1998) citam que os valores médios de RMSE para correlações com a razão de insolação podem variar entre 1,36 e 3,32 MJ m⁻² para superfícies horizontais. Para esse mesmo plano, Akinoglu & Ecevit (1990) que os modelos RIET, GOPI e QUAD apresentaram RMSE variando entre 1,85 e 2,0 MJ m⁻². O aumento do espalhamento das estimativas nos planos inclinados se justifica principalmente pelo incremento de radiação refletida, que aumenta isotropicamente com o aumento do ângulo de inclinação (Iqbal, 1983).

Tabela 2. Validações de diferentes modelos de estimativa da radiação global com base na razão de insolação, incidente em planos inclinados para o Norte, em Botucatu-SP.

Modelo	Inclinação	BEM		RMSE		Índice "d"
		MJ m ⁻²	Percentual	MJ m ⁻²	Percentual	
Reitveld (1978)	12,85°	-1,394	-6,754	4,048	19,613	0,87941
	22,85°	-0,506	-2,608	3,356	17,285	0,88324
	32,85°	-0,572	-3,882	5,819	39,502	0,60144
Gopinathan (1988)	12,85°	-0,789	-3,801	4,318	20,807	0,86675
	22,85°	-0,750	-3,843	3,373	17,273	0,87422
	32,85°	-1,682	11,421	5,910	40,129	0,68434
Quadrático	12,85°	-2,276	-11,107	4,282	20,897	0,86273
	22,85°	-0,746	-3,840	3,364	17,317	0,87890
	32,85°	0,571	3,868	5,745	38,946	0,73058
Modelo proposto	32,85°	0,115	0,558	4,178	20,341	0,88500
	32,85°	-0,557	-2,871	3,355	17,281	0,88138
	32,85°	-0,665	-4,508	4,713	48,720	0,81850

CONCLUSÕES: As estimativas da radiação global em superfícies inclinadas com a face para Norte apresentam ótimos resultados quando se obtêm os coeficientes $a = 0,20426 + 0,00142\beta$ and $b = 0,60342 - 0,00571\beta$ para aplicação na equação de Angstrom & Prescott.

REFERÊNCIAS:

- Akinoglu, B.G.; Ecevit, A. Construction of a quadratic model using modified Angstrom coefficients to estimate global solar radiation. **Energy**, v.43, n.2, p.85-92, 1990.
- Angström, A. Solar and terrestrial radiation. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v.50, p.121-126, 1924.
- CEPAGRI. Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas a Agricultura. **Clima dos municípios paulistas**. Disponível em: <http://www.cpa.unicamp.br>. Acesso: 30 Jan. 2011.
- Ertekin, C.; Yaldiz, O. Comparison of some existing modelos for estimating global solar radiation for Antalya (Turkey). **Energy Conversion & Management**, v.41, p.311-330, 2000.
- Gopinathan, K.K. A general formula for computing the coefficients of the correlation connecting global solar radiation to sunshine duration. **Solar Energy**, v.41, p.499-502, 1988.
- Iqbal, M. **An introduction to solar radiation**. Canadá: Academic Press, 1983. 390 p.
- Olgeman, H.; Ecevit, A.; Tasdemiroglu, E. A new method for estimating solar radiation from bright sunshine data. **Solar Energy**, v.33, p.619-630, 1984.
- Prescott, J. A. Evaporation from a water surface in relation to solar radiation. **Transactions of the Royal Society Science Australian**, v.64, p.114-118, 1940.
- Rensheng, C.; Shihua, L.; Ersi, K.; Jianping, Y.; Xibin, J. Estimating daily global radiation using two types of revised models in China. **Energy Conversion & Management**, v.47, p.865-878, 2006.
- Rietveld, H.R. A new method to estimate the regression coefficients in the formula relating radiation to sunshine. **Agricultural Meteorology**, v.19, p.243-252, 1978.
- Supit, I.; Van Kappel, R.R. A simple method to estimate global radiation. **Solar Energy**, v.63, n.3, p.147-160, 1998.