

# EQUAÇÕES DE ESTIMATIVAS ANUAIS E SAZONAIS DA RADIAÇÃO GLOBAL EM SUPERFÍCIES INCLINADAS EM FUNÇÃO DA RAZÃO DE INSOLAÇÃO

Adilson Pacheco de Souza<sup>1</sup>; João Francisco Escobedo<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 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.

<sup>2</sup> 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:** Empregou-se as frações da radiação global com a radiação no topo da atmosfera em correlação com a razão de insolação, objetivando determinar os coeficientes lineares e angulares do modelo Angstrom & Prescott para estimativa da radiação global incidente em superfícies horizontal e inclinadas a 12,85°, 22,85° e 32,85° para o Norte, em Botucatu-SP. A base de dados compreendeu-se de abril/1998 a dezembro/2007, com medidas nas três inclinações em diferentes épocas, todavia concomitantes ao plano horizontal. No agrupamento, o coeficiente  $a$  foi crescente com o aumento da inclinação, com valores mínimos de 0,2284 (12,85°), contudo inferiores ao observado na horizontal (0,2523). A maior transmissividade atmosférica foi de 75,78% para 12,85°, decrescendo com o aumento da inclinação (68,53% para 32,85°) e com valores intermediários na horizontal (0,7208). Nas estações ocorreram as mesmas tendências, porém com valores dos coeficientes dependentes da presença do clima local. As equações sazonais propiciaram em todas as inclinações melhores desempenhos na estimativa da radiação global quando comparada com as anuais.

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

## EQUATIONS OF ANNUAL AND SEASONAL ESTIMATES OF GLOBAL RADIATION IN TILTED SURFACES IN FUNCTION OF INSOLATION RATIOS

**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. The database is comprised of April/1998 to December 2007, with measures on slopes in three different eras, but concurrent to the horizontal plane. In grouping, the coefficient increased with increasing slope, with minimum values of 0.2284 (12.85°), but lower than that observed in the horizontal (0.2523). The highest atmospheric transmissivity was 75.78% to 12.85°, decreasing with increasing inclination (68.53% to 32.85°) and with intermediate values for the horizontal (0.7208). Seasonally occurred in the same tendencies, but with coefficients dependent on the presence of the local climate. The equations seasonal inclinations led in all the best performances in the estimation of global radiation compared with the annually grouping.

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

## INTRODUÇÃO:

A radiação solar incidente em um plano inclinado pode ser empregada como fonte energética suplementar e alternativa em projetos de coletores solares, projetos de arquitetura, planejamento urbano, estudos agrônômicos de insolação sobre vegetação e em estudos micrometeorológicos sobre circulação local. Na estimativa da radiação solar, normalmente são empregados dois tipos de modelo: estatísticos (ou de decomposição) e paramétricos. Os modelos paramétricos necessitam de informações mais detalhadas das condições atmosféricas locais ou a utilização de percentuais fixos de ocorrência de cada componente da radiação solar (El-Sebaei et al., 2010). Os modelos estatísticos são representados por equações matemáticas ajustadas por meio de regressão linear ou polinomial em correlações com as frações radiométricas ou com a razão de insolação. Esse último método se tornou o mais empregado, sendo que a definição dos

coeficientes lineares e angulares (a e b) da equação proposta por Angström(1924) e modificada por Prescott (1940) dependem de características climáticas locais, latitude, época do ano e altitude. Muitos trabalhos já foram desenvolvidos no Brasil para definição desses coeficientes nas diferentes regiões (Campello Junior, 1998; Blanco & Sentelhas, 2002; Tiba et al., 2005, entre outros), todavia, com correlações para a radiação global medida no plano horizontal, que são encontradas em várias localidades e partições temporais. Em superfícies inclinadas, medidas das componentes da radiação solar são escassas no território brasileiro. Por conseguinte, objetivou-se avaliar as correlações entre a radiação global e a razão de insolação (modelo Angstrom & Prescott), em agrupamentos anuais e sazonais, para superfícies horizontal e inclinadas a 12,85°, 22,85° e 32,85°, 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 7,45µV Wm<sup>-2</sup> e linearidade de ± 0,5 % ( 0 a 2800 W/m<sup>2</sup>). 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). As correlações foram avaliadas com agrupamentos anuais e sazonais com dados de 2 anos para 22,85° e 32,85°; 1 ano para 12,85° e 5 anos para horizontal, sendo os demais períodos empregados nas validações. Na avaliação do desempenho das equações de estimativas diárias nas superfícies inclinadas quanto nas horizontais foram empregados os indicativos estatísticos *MBE* (Mean Bias Error), *RMSE* (Root Mean Square Error), e “d” de Willmott (1981), dados por:

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

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:

A Figura 1 mostra as correlações entre os índices de claridade  $\langle K_T^d \rangle$  e a razão de insolação  $\langle n/N \rangle^d$ , com tendências lineares independentemente do ângulo de inclinação e os coeficientes de determinação acima de 0,93 mostram que as frações estão bem correlacionadas

com a razão de insolação. Os coeficientes  $a$  foram crescentes com o aumento da intensidade de inclinação, mostrando que para um dia completamente nublado, a transmissividade mínima da atmosfera situa-se acima de 22,84% (para inclinações superiores a 12,85°), contudo inferiores ao observado na horizontal (25,23%).

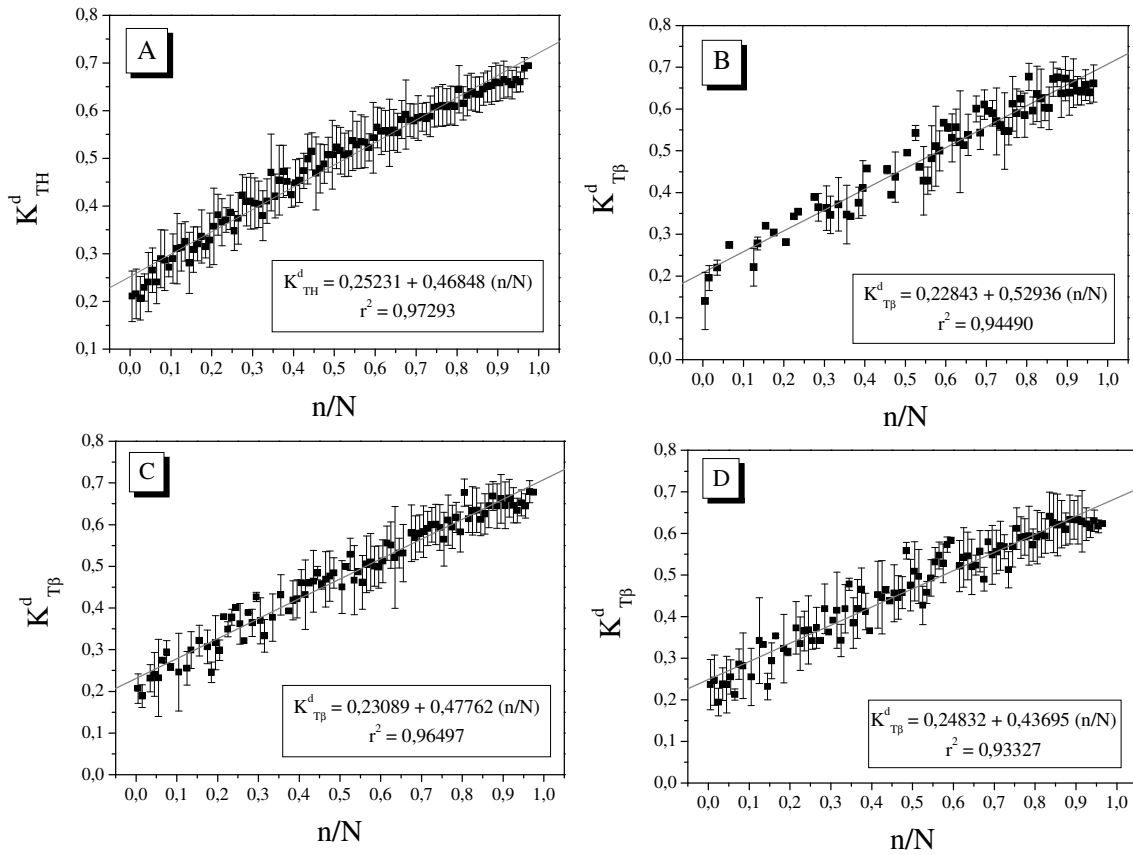


Figura 1. Correlações diárias entre o índice de claridade de superfície horizontal (a), inclinada para o Norte a 12,85° (b), 22,85° (c) e 32,85° (d) com a razão de insolação, em Botucatu-SP.

Já para dias com céu completamente aberto, onde a razão de insolação tende a 1, ocorre uma inversão, pois a maior transmissividade atmosférica é encontrada na inclinação de 12,85° (75,78%), decrescendo com o aumento da intensidade de inclinação (68,53% para a inclinação de 32,85°), com valores intermediários na horizontal (0,7208). Esses valores dos coeficientes  $a$  e  $b$  para os agrupamentos anuais horizontais foram inferiores aos valores em Botucatu-SP, 0,2635 e 0,4736, respectivamente (Escobedo et al., 2007). Esse comportamento é esperado quando se utiliza base de dados com diferentes períodos de análise (5 e 10 anos).

Nas validações as equações supracitadas apresentaram comportamentos de estimativas diferentes. Para a inclinação de 12,85°, houve uma tendência de subestimar os valores da radiação global inclinada em torno de 4,07% (-0,828 MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>), com um espalhamento de 9,8% (1,99 MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>). Com o aumento da inclinação para 22,85°, houve uma diminuição da tendência de subestimar para 1,46% (-0,223 MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>), porém com maior espalhamento (10,09%). Para as maiores inclinações (32,85°), o modelo anual ajustado superestimou os valores da global inclinada em 10,71% (1,53 MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) com espalhamentos em torno de 24,4%. Entretanto, os três modelos anuais ajustados nas superfícies inclinadas apresentaram ajustamentos superiores a 90%, permitindo boas estimativas da radiação global inclinada.

Nas correlações sazonais (Tabela 1), os coeficientes de determinação no verão e outono foram inferiores aos agrupamentos anuais para as três inclinações estudadas, provavelmente pela

não aplicação da curva média nessas correlações, o que possibilitou uma maior dispersão dos dados em relação a equação ajustada. Martínez-Lozano et al. (1984) apresentaram os valores dos coeficientes  $a$  e  $b$  encontrados em 120 trabalhos científicos de diversas regiões da Terra. Os valores dos coeficientes  $a$  e  $b$  encontrados nos agrupamentos anuais e sazonais da fração ( $K_{TP}^d$ ) são semelhantes aos verificados na maioria dos trabalhos para superfícies horizontais (com variações entre 0,14 e 0,35 para  $a$  e entre 0,35 e 0,79 para  $b$ ).

Tabela 1. Equações de estimativas sazonais das frações médias ( $K_{TP}^d$ ) em função de  $(n/N)^d$  em superfícies horizontal e inclinadas a 12,85°, 22,85° e 32,85° para o Norte.

Inclinação	Estação	Equação	R <sup>2</sup>
Horizontal	Verão	$K_{TP}^d = 0,24090 + 0,50055 (n/N)^d$	0,90398
	Outono	$K_{TP}^d = 0,26306 + 0,43475 (n/N)^d$	0,85937
	Inverno	$K_{TP}^d = 0,24597 + 0,44603 (n/N)^d$	0,90351
	Primavera	$K_{TP}^d = 0,24812 + 0,49360 (n/N)^d$	0,91619
12,85°	Verão	$K_{TP}^d = 0,25364 + 0,50750 (n/N)^d$	0,88787
	Outono	$K_{TP}^d = 0,22886 + 0,50938 (n/N)^d$	0,88816
	Inverno	$K_{TP}^d = 0,20161 + 0,54454 (n/N)^d$	0,93113
	Primavera	$K_{TP}^d = 0,22672 + 0,58302 (n/N)^d$	0,94624
22,85°	Verão	$K_{TP}^d = 0,24152 + 0,51575 (n/N)^d$	0,94648
	Outono	$K_{TP}^d = 0,19162 + 0,48755 (n/N)^d$	0,89046
	Inverno	$K_{TP}^d = 0,18462 + 0,48213 (n/N)^d$	0,93745
	Primavera	$K_{TP}^d = 0,24226 + 0,51338 (n/N)^d$	0,94142
32,85°	Verão	$K_{TP}^d = 0,24350 + 0,49311 (n/N)^d$	0,88142
	Outono	$K_{TP}^d = 0,21578 + 0,43841 (n/N)^d$	0,89698
	Inverno	$K_{TP}^d = 0,20393 + 0,44495 (n/N)^d$	0,93013
	Primavera	$K_{TP}^d = 0,21099 + 0,48829 (n/N)^d$	0,94099

Os resultados das validações das correlações sazonais entre ( $K_{TP}^d$ ) e  $(n/N)^d$  são apresentados na Tabela 2. Nos dias de verão, independentemente do ângulo de inclinação, os modelos sazonais, apresentaram tendências de subestimar os valores de ( $H_{GP}^d$ ) em até -1,93 MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> (-9,53%). Nas demais estações, os modelos superestimaram os valores de ( $H_{GP}^d$ ), com máximo de 1,67 MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> (8,86%) no inverno para a inclinação de 22,85°. Já os espalhamentos variaram entre 1,56 e 3,91 MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, com máximos em outono e inverno da inclinação de 32,85°, decorrentes das elevadas razões de nebulosidade dos meses de abril, maio e junho de 2004, em conjunto com junho, setembro e outubro de 2005 (Tabela 1), que também influenciaram nos baixos valores de ajustamento. Nas demais estações, os ajustamentos foram superiores a 0,9102. Apenas no outono e inverno para a inclinação de 22,85°, os modelos anuais apresentaram desempenhos melhores do que os modelos sazonais, tanto em termos energéticos como percentuais, em função da equação anual ser obtida para os valores médios gerais do agrupamento total, ou seja, agrupamentos menores de dados tendem a apresentar melhores desempenhos, todavia, principalmente em condições médias de transmissividade atmosférica (estações como outono e primavera). Supit & Van Kappel (1998) encontraram valores médios de RMSE para correlações com  $(n/N)^d$  podem variar entre 1,36 e 3,32 MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> para superfícies horizontais, corroborando com a grande maioria dos valores de RMSE encontrados nesse trabalho.

Tabela 2. Validações das relações entre  $(K_{TP}^d)$  e  $(n/N)^d$  com equações e agrupamentos sazonais.

Inclinação	Mês	Medido (MJ m <sup>-2</sup> )	Estimado (MJ m <sup>-2</sup> )	MBE (MJ m <sup>-2</sup> )	RMSE (MJ m <sup>-2</sup> )	MBE (%)	RMSE (%)	d
Horizontal	Verão	20,99	20,16	-0,84	2,26	-3,98	10,77	0,96
	Outono	16,11	15,48	-0,64	1,53	-3,95	9,45	0,96
	Inverno	16,06	15,31	-0,74	1,41	-4,58	8,77	0,96
	Primavera	21,44	21,21	-0,22	1,94	-1,03	9,07	0,97
12,85°	Verão	19,68	18,66	-1,03	2,09	-5,22	10,61	0,97
	Outono	-	-	-	-	-	-	-
	Inverno	21,50	21,91	0,42	1,91	1,95	8,88	0,96
	Primavera	20,62	20,66	0,04	2,20	0,18	10,69	0,97
22,85°	Verão	20,22	18,29	-1,93	2,75	-9,53	13,62	0,91
	Outono	19,32	20,77	1,45 <sup>a</sup>	2,43 <sup>a</sup>	7,52 <sup>b</sup>	12,60 <sup>b</sup>	0,94 <sup>c</sup>
	Inverno	18,89	20,57	1,67	2,32	8,86	12,31	0,94
	Primavera	20,31	21,07	0,76	1,56	3,73	7,67	0,98
32,85°	Verão	18,52	17,57	-0,95	2,00	-5,13	10,79	0,96
	Outono	16,68	17,03	0,35	3,91	2,07	23,46	0,74
	Inverno	17,29	18,31	0,96	3,24	5,55	18,73	0,85
	Primavera	12,00	13,07	1,07	2,53	8,91	21,12	0,96

As equações sazonais apresentaram resultados de validações inferiores aos encontrados pela aplicação dos modelos anuais nas estações em termos energéticos (a), em percentual (b) e em ajustamento (c).

**CONCLUSÕES:** Existe uma correlação linear entre a radiação global e a razão de insolação para superfícies inclinadas, com coeficientes lineares e angulares crescentes e decrescentes com o aumento do ângulo de inclinação e inferiores ao verificado para a horizontal. As equações sazonais possibilitaram melhores desempenhos na estimativa da radiação global inclinada.

#### REFERÊNCIAS:

- Angström, A. Solar and terrestrial radiation. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v.50, p.121-126, 1924.
- Blanco, F.F.; Sentelhas, P.C. Coeficientes da equação de Antsgröm-PreScott para estimativa da insolação para Piracicaba, SP. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.10, p.295-300, 2002.
- Campelo Junior, J.H. Relação sazonal entre radiação solar global e insolação no Sudoeste da Amazônia. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.6, n.2, p.193-199, 1998.
- 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.
- El-Sebaili, A.A.; Al-Hazmi, F.S.; Al-Ghamdi, A.A.; Yaghmour, S.J. Global, direct and diffuse solar radiation on horizontal and tilted surfaces in Yeddah, Saudi Arabia. **Applied Energy**, v.87, p.568-576, 2010.
- Escobedo, J.F.; Gomes, E.N.; Oliveira, A.P.; Soares, J. Estimativa das radiações global, direta e difusa em função do índice de claridade (Kt) e razão de insolação (n/N). In: Congresso Brasileiro de Energia Solar, 1, 2007, Fortaleza. **Anais..** Fortaleza: ABENS, 2007. I CD-ROM.
- Iqbal, M. **An introduction to solar radiation**. Canadá: Academic Press, 1983. 390 p.
- Martínez-Lozano, J.A.; Tena, F.; Onrubia, J.E.; De La Rubia, J. The historical evolution of the Angstrom formula and its modifications: review and bibliography. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.33, n.1, p.109-128, 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.
- Supit, I.; Van Kappel, R.R. A simple method to estimate global radiation. **Solar Energy**, v.63, n.3, p.147-160, 1998.
- Tiba, C.; Aguiar, R.; Fraidenraich, N. Analysis of a new relationship between monthly global irradiation and sunshine hours from a database of Brazil. **Renewable Energy**, v.30, n.6, p.957-966, 2005.