

# Determinação dos coeficientes da equação de Angstron para a região de Palotina, Estado do Paraná

Rivanildo Dallacort, Paulo Sérgio Lourenço de Freitas, Antonio Carlos Andrade Gonçalves, Roberto Rezende, Altair Bertonha, Frederico Fonseca da Silva e Marcos Trintinalha

Departamento de Agronomia, Universidade Estadual de Maringá, Av. Colombo, 5790, 87020-900, Maringá, Paraná, Brasil.  
\*Autor para correspondência. e-mail: rivanildo@pop.com.br

**RESUMO.** O presente trabalho teve como objetivo a determinação dos parâmetros da equação de Angstron, com partição anual e mensal, para estimativa da irradiação solar global diária na região de Palotina, Estado do Paraná. Foram utilizados os dados climáticos de radiação solar global e o total de horas de brilho solar diário incidente na superfície da Terra, no período de 1982 a 2002. A cidade de Palotina, Estado do Paraná, está localizada nas seguintes coordenadas geográficas: latitude de 24°17'S, longitude de 53°50' W e altitude de 333m. A irradiação solar global apresentou os menores valores nos meses de declinação solar norte com valor mínimo de 7,82MJ m<sup>-2</sup> no dia 06 de julho, e maiores valores na declinação sul com valor máximo de 22,07MJ m<sup>-2</sup>, no dia 29 de novembro, com média anual de 14,27MJ m<sup>-2</sup>. A irradiação no topo da atmosfera apresentou o mesmo padrão de distribuição anual, com valor mínimo de 21,58MJ m<sup>-2</sup>, no dia 24 de junho e máximo de 44,51MJ m<sup>-2</sup> e no dia 01 de janeiro e média anual de 33,45MJ m<sup>-2</sup>. Os maiores valores da razão de insolação foram observados no inverno e menores no verão, variando no intervalo de 0,13 a 0,97, com valor médio de 0,58. O índice de claridade possui uma variação no intervalo de 0,32 a 0,55, sendo que 0,55 constitui o limite máximo de claridade para a região de Palotina, Estado do Paraná.

**Palavras-chave:** Angstron, coeficientes da equação, irradiação solar global, insolação

**ABSTRACT. Determination of Angstron's equation coefficients for the region of Palotina, Paraná state, Brazil.** This work aimed at adjusting the Angstron's equation coefficients, on monthly and annual basis, to the region of Palotina (24°17'S, 53°50'30" W and 333m of altitude), Paraná, Brazil. The purpose was to determine the global solar radiation on a daily basis. Climatic data of global solar radiation and total daily sunshine, from 1982 to 2002 were used to fit the equation. Lower values (7,82MJ m<sup>-2</sup>) of global solar radiation were verified at months with north solar declination and higher values (22,07MJ m<sup>-2</sup>) at months with south solar declination, with annual mean value of 14,27MJ m<sup>-2</sup>. The radiation that reached the atmosphere top presented similar annual trend, with a lowest value of 21,58MJ m<sup>-2</sup> on June 24<sup>th</sup> and highest value of 44,51MJ m<sup>-2</sup> on January 1<sup>st</sup>. Annual mean value was of 33,45MJ m<sup>-2</sup>. Higher value of insolation ratio were obtained in the winter and lower values occurred in the summer, ranging from 0,13 to 0,97, with 0,58 as a mean value. The brightness index ranged from 0,32 to 0,55, and 0,55 constitute the maximum brightness index for the region of Palotina, Paraná.

**Key words:** Angstrom, equation coefficients, solar radiation, insolation.

## Introdução

A radiação solar se propaga na atmosfera, até atingir a superfície da Terra. Os processos de espalhamento e absorção fazem com que os valores da radiação, que chega na superfície da Terra, sejam de, aproximadamente, 51% da radiação incidente no topo da atmosfera (Ometto, 1981). O conhecimento do padrão de distribuição dos valores da razão de insolação ( $r$ ) de uma região é muito importante para

avaliação e dimensionamento de projetos de irrigação, aquecimento e utilização da energia fotovoltaica. Pode ser interpretada conhecendo-se os valores limites da equação de Angstron:

$$K = a + br \quad (1)$$

em que:

K - índice de claridade;

a, b - constantes e

r - razão de insolação ( $n/N$ ).

Observa-se, nessa equação, que o índice de claridade tende ao máximo no momento em que a razão de insolação tende a um, situação de ausência de nuvens ou máximo de brilho solar. Por outro lado, esse índice tende ao mínimo no momento em que a razão de insolação tende a zero, situação de elevada nebulosidade ou número de horas de brilho solar próximo de zero, determinando a variação da radiação solar que atinge um plano horizontal da Terra em relação à que atinge o topo da atmosfera.

Em um estudo dos limites da equação de Angstrom para a região de Cascavel, Estado do Paraná, com partição anual, Valiati *et al.* (1999) concluíram que o índice de claridade mínimo é 0,16 e o máximo é 0,56. Ricieri (1998) encontrou um índice de claridade mínimo de 0,22 e máximo de 0,71 para a cidade de Botucatu, Estado de São Paulo.

Dantas *et al.* (1999) estudaram esse mesmo fenômeno para duas cidades do Estado da Paraíba, verificando para a cidade de Cabaceiras, que o mínimo e o máximo do índice de claridade ocorreram no mês de novembro, estando compreendido entre 0,13 e 0,73 e para a cidade de Belém do Brejo do Cruz, o mínimo ocorreu no mês de setembro e o máximo no mês de julho, estando compreendido entre 0,11 e 0,76.

Santos *et al.* (1983) encontraram para a cidade de Jaboticabal, Estado de São Paulo, uma transmissividade máxima de 0,75 para a partição anual. Já Cury-Lunardi e Cataneo (1994), para a cidade de Botucatu, Estado de São Paulo, encontraram 0,67 e 0,71 para primavera-verão e outono-inverno, respectivamente, estando próximo ao encontrado por Laperuta Filho (1996) para a mesma região. Este autor obteve os valores 0,70 para a primavera, 0,72 para o inverno, 0,66 para o outono e 0,65 para o verão.

Jesus e Cury-Lunardi (1997) observaram que os valores médios da razão de insolação ocorreram, em ordem decrescente, no período de inverno, outono, primavera e verão, mostrando que tanto a precipitação, ocorrida na região em outubro e março, quanto o tipo de nuvem, gênero cirrus no outono/inverno e cúmulus na primavera/verão, possuem influência na razão de insolação. Na região sul do Brasil, segundo Tubelis e Nascimento (1992), a variação da insolação é inversa das demais regiões, atingindo seus valores mínimos em janeiro, fevereiro e março, e máximos em junho, julho e agosto, sendo os valores médios mensais extremos iguais a 39% em fevereiro e 57% em junho.

Aguiar *et al.* (1999) observaram, em um estudo sobre a razão de insolação para Fortaleza, Estado Ceará, que a transmissividade da atmosfera na região

do Sertão é maior que na região do litoral para um dia completamente nublado, provavelmente devido aos maiores índices de umidade da região do litoral.

A irradiação solar global não é medida de forma contínua na maioria das estações meteorológicas, centro de pesquisas e universidades brasileiras, destacando-se, no Estado do Paraná, o Instituto Agrônomo do Paraná (Iapar) com 33 estações meteorológicas, onde são medidas diariamente a irradiação solar global utilizando o piranômetro ou actinógrafo, número de horas de brilho solar incidente na superfície da Terra, através do heliógrafo, temperaturas máximas e mínimas, precipitação e outros parâmetros meteorológicos.

Ricieri *et al.* (1996) obtiveram os coeficientes "a" e "b" da equação de Angstrom, utilizando uma série de dados, da radiação medida por piranômetro de alta precisão, na localidade de Botucatu, Estado de São Paulo. Os resultados foram comparados com os encontrados por Tubelis (1988) que utilizou uma série de dados obtidos por um actinógrafo, na mesma localidade, os autores concluíram que os coeficientes não diferem entre si, demonstrando que a radiação medida por actinógrafo pode ser utilizada nos cálculos dos coeficientes de Angstrom.

O alto custo dos instrumentos e a necessidade de um técnico especializado para a coleta de dados e manutenção dos equipamentos faz com que várias regiões não tenham informações sobre os valores de irradiação solar global. Devido a esse fato, pesquisadores vêm utilizando modelos matemáticos ou estatísticos para estimar essa componente, com boa precisão, relacionando a irradiação solar no topo da atmosfera com a razão de insolação ( $r$ ).

Um dos pioneiros na utilização de modelos para estimativa da irradiação solar global foi Angstrom, em 1924, usando a equação:

$$\frac{R_G}{R_C} = a + (1 - \alpha) r \quad (2)$$

em que:

$R_G$  - irradiação global ( $\text{MJ m}^{-2}$ );

$R_C$  - irradiação total sob atmosfera real em dia completamente limpo ( $\text{MJ m}^{-2}$ );

$\alpha$  - fração da radiação recebida em um dia completamente nublado pela medição em dia completamente limpo.

Devido à dificuldade na medição de  $R_C$ , a qual deve ser medida em dias de céu limpo, o que não ocorre com frequência em muitas regiões, Prescott (1940) correlacionou a irradiação solar encontrada na superfície da Terra com a encontrada no topo da atmosfera ( $R_0$ ), obtida por meio do uso de equação,

a qual, mesmo após a modificação, continua sendo denominada equação de Angstron:

$$\frac{R_G}{R_0} = a + br \quad (3)$$

em que:

“a” e “b” são coeficientes da equação de Angstron.

Os coeficientes da equação de Angstron foram calculados para diversas localidades por um grande número de pesquisadores, podendo ser encontrados em trabalhos de Martinez-Lozano *et al.* (1984), que cobrem praticamente todo o Território Nacional, Ometto (1968) para Piracicaba, Ricieiri *et al.* (1996) para Botucatu, Lopes *et al.* (1971) para o Rio Grande do Sul, Crivelli (1973) para Argentina, entre outros. Esses coeficientes variam de região para região sendo dependentes da latitude, altitude, tipo de nuvem e concentração de poluentes naturais e artificiais. Devido a essas variações, os coeficientes somente podem ser comparados quando estimados com as mesmas partições e para uma mesma região, (Ribeiro, 1980; Ometto, 1981; Martinez-Lozano *et al.*, 1984 e Laperuta Filho, 1996).

Os coeficientes “a” e “b” da equação são calculados mediante o uso de regressão linear, utilizando-se dados diários, quinzenais, mensais, sazonais, anuais e, recentemente, Dal Pai e Escobedo (1999) vêm estudando a partição instantânea (ou 5 minutos).

O coeficiente “a” indica o valor de  $R_G/R_0$  quando há cobertura total do céu por nuvens, ou seja,  $n/N=0$ , o que não ocorre com frequência em determinadas regiões. O coeficiente “b” define a taxa de transmissão da radiação solar quando  $n/N$  tende a um. Para Hinrichsen (1994), citado por Souza e Alves (1997), o coeficiente “a” representa a fração difusa da irradiação solar global e o coeficiente “b” a direta.

Em um estudo realizado para a cidade de Jaboticabal, Estado de São Paulo, com partição mensal e anual, Santos *et al.* (1983) observaram diferenças significativas entre os coeficientes da equação de Angstron, com um coeficiente de correlação maior que 0,90. O coeficiente “a” variou entre 0,22 a 0,29 e o coeficiente “b” de 0,45 a 0,51.

Um modelo de estimativa da irradiação solar global diária mensal foi proposto por Caramori *et al.* (1985) para a cidade de Ponta Grossa, Estado do Paraná, (25°13'S), com coeficiente de determinação de 0,88 para a seguinte equação:

$$\frac{R_G}{R_0} = \left( 0,20 + 0,46 \frac{n}{N} \right) \quad (4)$$

Analisando os valores diários da irradiação solar e o número de horas de brilho solar para os anos de 1974, 1975 e 1983, Butler e Miranda (1983) determinaram os coeficientes da equação de Angstron, registrados no Centro de Pesquisas de Cacau em Ilhéus, Estado da Bahia, e observaram que houve variações mensais e que as estimativas anuais apresentaram-se mais constantes com os valores de  $a=0,27$  e  $b=0,37$ .

Em trabalho desenvolvido para uma região litorânea próxima de Recife, Estado do Pernambuco, Reis *et al.* (1973) encontraram um modelo anual com os valores de “a” igual a 0,26 e “b” igual a 0,31, podendo este ser usado para a zona da mata úmida em Pernambuco, devido à semelhança climática.

Para a cidade de Petrolina, Estado do Pernambuco, com latitude de 09°09'S, Teixeira (1999) observou que os maiores valores de “b” ocorrem quando o sol culmina na latitude (no período seco), nos meses de setembro e outubro, época em que a radiação percorre um menor caminho para incidir no solo nos meses de março e abril, quando o sol culmina novamente na região, os valores de “b”,  $n/N$  e  $R_G/R_0$  apresentam-se menores do que nos meses citados anteriormente. Nesse período ocorre uma menor transmissividade da radiação na atmosfera, correspondendo ao período chuvoso, constatando-se, também, uma pequena variabilidade interanual nos coeficientes “a” e “b” da equação de Angstron.

Mediante o exposto, este trabalho tem como objetivo a determinação dos parâmetros da equação de Angstron, com partição anual e mensal, para estimativa da irradiação solar global diária na região de Palotina, Estado do Paraná.

## Material e métodos

Os dados climáticos, irradiação solar global e o total de horas de brilho solar diário incidente na superfície da Terra de 1982 a 2002, utilizados neste trabalho, foram fornecidos pelo Instituto Agrônomo do Paraná (Iapar), Londrina, Estado do Paraná, coletados em sua estação meteorológica localizada em Palotina, Estado do Paraná, (latitude de 24°17'S, longitude de 53°50' W e altitude de 333m). A estação meteorológica estava localizada em terreno plano, com boa visão do horizonte. Os dados foram obtidos diariamente, do nascer ao pôr do sol por período de vinte e um anos. As medidas da irradiação solar global foram obtidas por um

actinógrafo (R.Fuess - Berlin - Steglitz), e o total de horas de brilho solar diário incidente na superfície da Terra (n) obtido por heliógrafo (R.Fuess - Berlin - Steglitz).

Os cálculos da declinação Solar ( $\delta$ ), ângulo horário ( $W_s$ ), fator de correção da excentricidade da órbita terrestre ( $E_o$ ), irradiação no topo da atmosfera ( $R_o$ ) e cálculo da razão de insolação (r) foram efetuados por meio das equações citadas por Iqbal (1983).

Índice de claridade é a razão entre a irradiação solar global ( $R_G$ ) e a irradiação no topo da atmosfera ( $R_o$ ), dado pela equação:

$$K_t = \frac{R_G}{R_o} \quad (5)$$

A razão de insolação é a razão entre o total de horas de brilho solar diário na superfície da Terra (n) e o número máximo de brilho solar no topo da atmosfera (N), dada pela equação:

$$r = \frac{n}{N} \quad (6)$$

O número máximo de brilho solar incidente no topo da atmosfera (N), em horas, foi obtido através da equação:

$$N = \frac{2W_s}{15} \quad (7)$$

em que:

$W_s$  - ângulo solar em graus, obtido pela equação:

$$W_s = ar \cos(tg\Phi tg\delta) \quad (8)$$

em que:

$\Phi$  - latitude local em graus;

$\delta$  - declinação solar em graus dada pela equação:

$$\delta = 23,45 \operatorname{sen}\left(\frac{360}{365}(284 + DJ)\right) \quad (9)$$

em que:

DJ - dia Juliano.

A irradiação solar incidente em uma superfície horizontal no topo da atmosfera em MJ m<sup>-2</sup>, é calculada pela expressão:

$$R_o = \frac{24}{\pi} 1367 E_o \left( \frac{\pi}{180} W_s \operatorname{sen}\Phi \operatorname{sen}\delta + \cos\Phi \cos\delta \operatorname{sen}W_s \right) \quad (10)$$

em que:

$E_o$  - fator de correção da excentricidade da órbita terrestre, dado pela fórmula:

$$E_o = 1,000110 + 0,034221 \cos\Gamma + 0,00128 \operatorname{sen}\Gamma + 0,0000719 \cos 2\Gamma \quad (11)$$

em que:

$$\Gamma = \frac{2\pi(DJ - 1)}{365,242} \quad (12)$$

Da série de 21 anos de dados (1982 a 2002), quinze anos (1982 a 1996) foram utilizados para cálculo dos coeficientes "a" e "b" da equação de Angstrom, separando-os com partições anual e mensal. Para a partição anual, separaram-se os dados do dia 1º de janeiro a 31º de dezembro para cada ano, totalizando quinze anos. Para a partição mensal, separaram-se os dados do dia 1º ao último dia de cada mês, totalizando uma série para os 12 meses do ano.

Após essa etapa, foram realizados os cálculos dos coeficientes "a" e "b" por meio de regressão linear simples para cada partição, obtendo-se os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) para cada equação.

Os dados de 1997 a 2002 foram utilizados para a estimativa da irradiação solar global e validação dos modelos. Para a obtenção destes, foram respeitadas as mesmas datas referentes às partições anual e mensal. Em primeiro lugar, agrupou-se do dia 1º até o último dia de cada mês, referentes aos seis anos. Após esta separação, com os valores de "a" e "b" calculados anteriormente para as respectivas partições, estimou-se a irradiação solar global diária. Essa mesma separação foi realizada para o total de dados (1982 a 1996) para o estudo do comportamento da irradiação solar global na região de Palotina, por intermédio de gráficos. Após essa estimativa, calcularam-se as médias dos valores diários da irradiação solar, totalizando 366 dias, sendo esse mesmo procedimento realizado para os dados reais. Em seguida foi realizada uma comparação entre os valores estimados e reais com base nos erros médios diários pela seguinte equação:

$$\Delta(\%) = 100 \left( \left( \frac{R_{Greais} - R_{Gest}}{R_{Greais}} \right) \right) \quad (13)$$

em que:

$R_{Greais}$  - Irradiação solar global real e

$R_{Gest}$  - Irradiação solar global estimada.

Para o cálculo das médias dos erros foi utilizado o módulo dos erros médios diários ( $|\Delta(\%)|$ ).

## Resultados e discussão

Na Figura 1, pode-se observar a distribuição dos valores de irradiação solar global ( $R_G$ ) e da irradiação solar no topo da atmosfera ( $R_o$ ) a partir de médias diárias, para o período de 1982 a 1996 na região de Palotina, Estado do Paraná. Os maiores valores das duas radiações ocorreram no período de outubro a março e os menores de abril a setembro. A irradiação solar global apresentou o valor mínimo de 7,82MJ m<sup>-2</sup>, no dia 06 de julho e o máximo de 22,07MJ m<sup>-2</sup>, no dia 29 de novembro, com média de 14,27MJ m<sup>-2</sup>. A

irradiação no topo da atmosfera apresentou limite mínimo de  $21,58 \text{ MJ m}^{-2}$ , no dia 24 de junho e máximo de  $44,51 \text{ MJ m}^{-2}$ , no dia 01 de janeiro, com média de  $33,45 \text{ MJ m}^{-2}$ . O máximo da irradiação solar global que incide na superfície da Terra corresponde a 73,67% da irradiação incidente no topo da atmosfera. Considerando-se que durante o ano a declinação solar varia de  $23,45^\circ$  a  $-23,45^\circ$  e que devido a essa declinação a duração do dia no solstício de verão é maior no hemisfério Sul do que no hemisfério Norte, ou seja, nessa data o hemisfério Sul está recebendo o máximo de energia solar, ocorrendo o inverso com o solstício de inverno e intermediário com os equinócios de primavera e outono, os resultados obtidos estão coerentes.

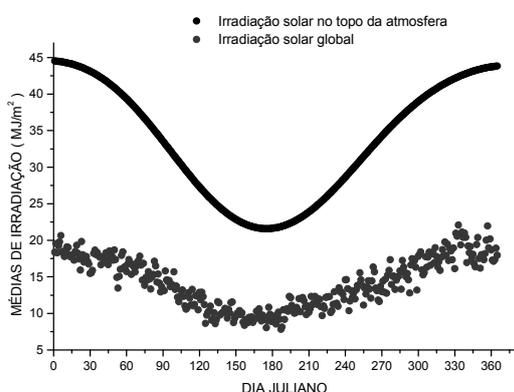


Figura 1. Médias diárias da irradiação solar global e no topo da atmosfera para o período de 1982 a 1996.

Na Figura 2, pode-se observar as médias diárias da razão de insolação para o período de 1982 a 1996. Observa-se uma variação dos dados no intervalo de 0,13 a 0,97, com média de 0,58. As frequências dos valores da razão de insolação foram: 18% para os valores menores que 0,50; 74% para valores compreendidos no intervalo de 0,50 a 0,70 e 8% para valores superiores a 0,70. Os maiores valores da razão de insolação são observados no período de inverno e outono e os menores no período de verão e primavera. Os maiores valores da razão de insolação encontrados no período de inverno e os menores no período de verão, também foram observados por Jesus e Cury-Lunardi (1997) para a cidade de Botucatu, Estado de São Paulo e estão de acordo com os estudos realizados por Tubelis e Nascimento (1992) para a região Sul.

Na Figura 3 está apresentada a variação do índice de claridade ( $k_t$ ) a partir de médias diárias ao longo do período de 1982 a 1996. Houve uma variação no intervalo de 0,32 a 0,55 com média de 0,43, ou seja, a irradiação solar global média incidente na superfície da Terra é inferior a 55% da irradiação solar incidente

no topo da atmosfera, estando superior ao encontrado na literatura, que é de aproximadamente 51%, conforme Ometto (1981). Em nenhum momento foram observados níveis de  $k_t$  acima de 0,55, constituindo o limite máximo de claridade local, e para o intervalo de 0,37 a 0,47 tem-se o maior número de pontos, com 80% dos valores observados. Comparando esse resultado com os obtidos por Ricieri (1998), pode-se concluir que o valor de  $k_t$  é específico para cada região.

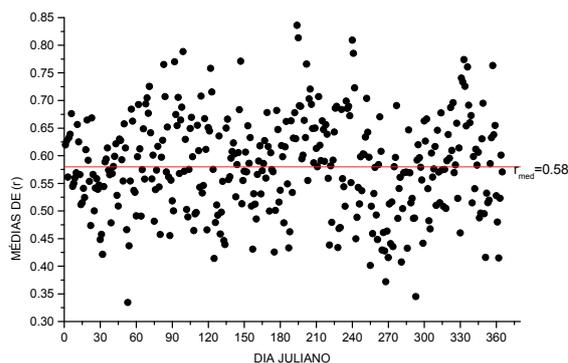


Figura 2. Médias diárias da razão de insolação para o período de 1982 a 1996.

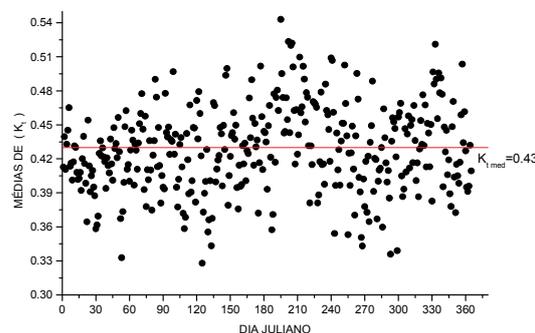


Figura 3. Médias diárias do índice de claridade ( $k_t$ ) para o período de 1982 a 1996.

Os coeficientes de Angstrom para as diferentes partições foram encontrados por meio de regressão linear simples. Observou-se que as variações dos dados foram pequenas, mostrando uma boa precisão das equações apresentadas para cada partição.

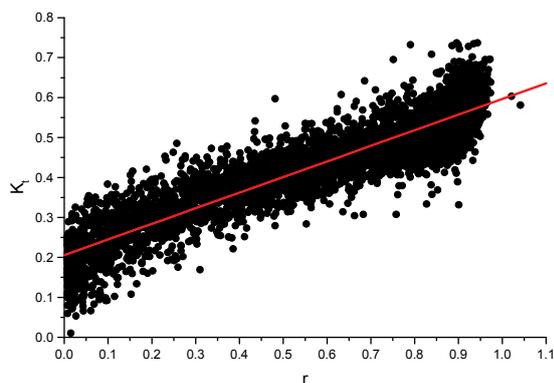
**Partição anual**

Na Tabela 1 está apresentada a equação de Angstrom, com seus coeficientes “a” e “b” obtidos com os dados da Figura 4 e o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), que é de 84%, estando próximo ao encontrado por Caramori *et al.* (1985) para a cidade de Ponta Grossa, Estado do Paraná. Na Figura 4, observa-se uma boa distribuição dos pontos, variando no intervalo de 0 a 0,73 para o índice de claridade e de

0 a 1,0 para a razão de insolação.

**Tabela 1.** Equação de Angstron ( $K_t=a+b*r$ ) e coeficiente de determinação ( $R^2$ ), para partição anual

Nº de dias observados	Partição	Equação	$R^2$ (%)
5459	Anual	$K_t=0,206+0,391*r$	83,9



**Figura 4.** Relação entre o índice de claridade ( $K_t = R_G/R_0$ ) e a razão de insolação ( $r$ ), para partição anual no período de 1982 a 1996.

Fazendo um estudo de limite na equação de Angstron apresentada na Tabela 1, determinaram-se os valores mínimo ( $K_{tmin}$ ) e máximo ( $K_{tmax}$ ) do índice de claridade. Quando “ $r$ ” tende a zero, situação de elevada nebulosidade ou número de horas de brilho solar próximo de zero,  $K_t$  é igual ao coeficiente linear “ $a$ ”, definindo o mínimo da irradiação solar global que atinge a superfície terrestre. Quando “ $r$ ” tende a um, situação de ausência total de nuvens ou máximo de horas de brilho solar,  $K_t$  tende à soma dos coeficientes “ $a$ ” e “ $b$ ”, obtendo-se a transmissividade máxima da irradiação solar global. Desta forma, a irradiação solar na superfície terrestre em um ano está compreendida entre 20,6% a 59,7% da irradiação incidente no topo da atmosfera, sendo esses valores superiores a 16% a 56% encontradas por Valiati *et al.* (1999) para a região de Cascavel, Estado Paraná.

#### Partição mensal

Na Tabela 2 estão apresentadas as equações de Angstron para cada mês do ano, os seus respectivos coeficientes “ $a$ ” e “ $b$ ” e coeficientes de determinação ( $R^2$ ), variando entre 82% a 90%. Houve uma menor variação do coeficiente “ $a$ ” (0,16 a 0,23) que do coeficiente “ $b$ ” (0,32 a 0,48). Observa-se que quando o coeficiente “ $b$ ” aumenta o coeficiente “ $a$ ” diminui e vice-versa. Houve um maior aumento do coeficiente “ $b$ ” para os meses de maio a novembro, não ocorrendo o mesmo com o coeficiente “ $a$ ”. Na Figura 4 é apresentada a relação do índice de claridade ( $K_t = R_G/R_0$ ) com a razão de insolação ( $r$ ), para o mês de

janeiro a dezembro no período de 1982 a 2002.

**Tabela 2.** Equações de Angstron ( $k_t=a+b*r$ ) e coeficientes de determinação ( $R^2$ ), para partição mensal

Nº de dias observados	Meses	Equações	$R^2$ (%)
463	Janeiro	$K_t=0,218+0,338*r$	85,4
414	Fevereiro	$K_t=0,230+0,328*r$	82,3
447	Março	$K_t=0,204+0,366*r$	86,7
449	Abril	$K_t=0,192+0,381*r$	83,2
465	Maió	$K_t=0,162+0,441*r$	90,5
450	Junho	$K_t=0,184+0,435*r$	87,6
464	Julho	$K_t=0,165+0,467*r$	90,2
465	Agosto	$K_t=0,182+0,436*r$	86,3
465	Setembro	$K_t=0,160+0,488*r$	88,5
463	Outubro	$K_t=0,161+0,470*r$	90,3
450	Novembro	$K_t=0,192+0,412*r$	87,5
464	Dezembro	$K_t=0,208+0,379*r$	86,1

Fazendo um estudo de limite nas equações da Tabela 3, determinaram-se os valores dos índices de claridade ( $K_{tmin}$  e  $K_{tmax}$ ) apresentados na Tabela 3. Observa-se menor índice de claridade nos meses de maio, julho, setembro e outubro e maior no mês de julho, setembro e outubro, estando compreendidos entre 16% a 64% da irradiação incidente no topo da atmosfera. A maior incidência para o mês de julho também foi observada para a cidade de Belém do Brejo do Cruz, no Estado da Paraíba, por Dantas (1999).

**Tabela 3.** Índices de claridade mínimos ( $K_{tmin}$ ) e máximos ( $K_{tmax}$ ) observados por meio das equações de Angstron, para partição mensal

Meses	$K_{tmin}$	$K_{tmax}$
Janeiro	0,218	0,556
Fevereiro	0,230	0,558
Março	0,204	0,570
Abril	0,192	0,573
Maió	0,162	0,603
Junho	0,184	0,619
Julho	0,165	0,632
Agosto	0,182	0,618
Setembro	0,161	0,649
Outubro	0,160	0,630
Novembro	0,192	0,604
Dezembro	0,208	0,587

#### Validação do modelo

##### Partição anual

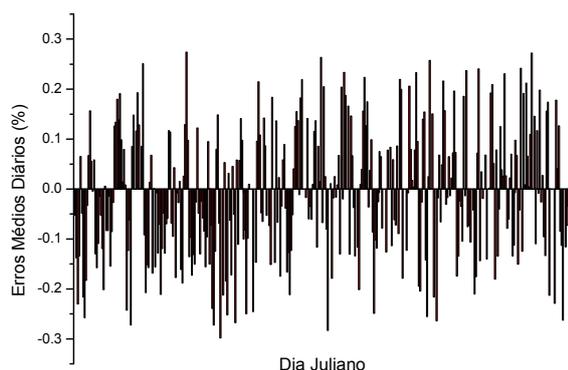
Na Tabela 4 estão apresentadas as médias dos valores reais ( $R_{Grealis}$ ) e estimados ( $R_{Gest}$ ) da irradiação solar global, a média dos erros ( $|\Delta|$ ) e o desvio padrão médio ( $S$ ).

A distribuição de frequência dos erros médios diários, para o período da validação do modelo, está apresentada na Figura 5. Observa-se uma variação no intervalo de -29% a 27%, havendo uma maior concentração dos erros no intervalo de -15% a 15%, e neste intervalo estão contidos 70% dos erros. Nos demais intervalos, a frequência dos erros, está distribuída da seguinte forma: 16% da frequência dos erros médios estão contidos no intervalo de -29% a -15%, e 14% no intervalo de 15% a 27%, sendo

observados nestes intervalos uma maior variação dos erros. O modelo possui uma tendência em superestimar a irradiação solar global, sendo que dos 366 dias, 202 estão no intervalo negativo e 163 no intervalo positivo.

**Tabela 4.** Médias dos valores reais ( $R_{G_{reais}}$ ) e estimados ( $R_{G_{gest}}$ ) da irradiação solar global, média dos erros ( $|\Delta|$ ) e desvio padrão médio (S), para partição anual.

Média dos dias observados	Partição	$R_{G_{reais}}$ (MJ/m <sup>2</sup> )	$R_{G_{gest}}$ (MJ/m <sup>2</sup> )	$ \Delta $ (%)	S (%)
366	Anual	14,40	14,51	11,08	7,26



**Figura 5.** Distribuição de frequência dos erros médios diários para o período da validação do modelo, para partição anual

### Partição Mensal

Na Tabela 5 estão apresentadas as médias dos valores reais ( $R_{G_{reais}}$ ) e estimados ( $R_{G_{gest}}$ ) da irradiação solar global, médias dos erros ( $|\Delta|$ ) e desvios padrões médios (S) para o período de validação do modelo. A maior incidência da irradiação solar global estimada e real foi observada para dezembro e a menor para junho. O ajuste mais eficaz do modelo ocorreu nos meses de janeiro, março e abril e o menos eficaz para o mês de maio, agosto, setembro e dezembro, onde foram observados os menores e maiores valores das médias dos erros e desvios padrões médios, respectivamente.

**Tabela 5.** Médias dos valores reais ( $R_{G_{reais}}$ ) e estimados ( $R_{G_{gest}}$ ) da irradiação solar global, médias dos erros ( $|\Delta|$ ) e desvios padrões médios (S), para a partição mensal.

Meses	$R_{G_{reais}}$ (MJ m <sup>-2</sup> )	$R_{G_{gest}}$ (MJ m <sup>-2</sup> )	$ \Delta $ (%)	S (%)
Janeiro	18,08	18,32	8,06	5,77
Fevereiro	17,20	16,34	12,06	7,47
Março	15,55	15,62	8,84	6,11
Abril	12,78	13,25	9,96	8,08
Mai	10,29	10,30	16,62	12,26
Junho	9,43	9,02	14,06	12,45
Julho	10,47	10,66	12,36	12,48
Agosto	11,89	12,03	15,22	10,58
Setembro	13,41	13,43	18,25	13,59
Outubro	15,58	15,58	13,45	12,39
Novembro	18,16	17,62	11,44	7,98
Dezembro	18,63	19,03	15,99	11,52

### Conclusão

Pelo estudo do limite nas equações de Angstrom observou-se que o mínimo e o máximo de irradiação solar global que atinge a superfície da Terra está compreendido entre 0,16 a 0,64, na partição anual e mensal.

A variação do coeficiente “a” quando da análise das duas partições, foi de 0,16 a 0,23, já para o coeficiente “b” foi de 0,32 a 0,48.

A irradiação solar global apresentou seus menores valores nos meses de declinação solar norte com valor mínimo de 7,82MJ m<sup>-2</sup> no dia 06 de julho, e maiores valores na declinação sul, com valor máximo de 22,07MJ m<sup>-2</sup> no dia 29 de junho, com média anual de 14,27MJ m<sup>-2</sup>. A irradiação no topo da atmosfera apresentou o mesmo comportamento, com valor mínimo de 21,58MJ m<sup>-2</sup>, no dia 24 de junho e máximo de 44,51MJ m<sup>-2</sup> no dia 01 de janeiro e média anual de 33,45MJ m<sup>-2</sup>.

Os maiores valores da razão de insolação foram observados no solstício de inverno e menores no solstício de verão, variando no intervalo de 0,13 a 0,97 com valor médio de 0,58.

O índice de claridade possui uma variação no intervalo de 0,32 a 0,55, sendo que 0,55 constitui o limite máximo de claridade para a região de Palotina, Estado do Paraná.

### Referência

AGUIAR, J. V. *et al.* Estimativa da radiação solar a partir da insolação, na região metropolitana de Fortaleza, CE. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA 12, 1999, Florianópolis *Anais....* Florianópolis, 1999. p. 596-602. CD-ROOM.

BUTLER, D.R.; MIRANDA, R.A.C. Estimativa do fluxo de radiação global no Centro de Pesquisas do Cacau e área circunvizinhas. *Rev. Theobroma*, v.13. p.321-5, 1983.

CARAMORI, P.H. *et al.* Estimativa da radiação solar global diária para Ponta Grossa-PR, a partir da insolação diária. *Poliagro*, Bandeirantes, v.7. p.107-118, 1985.

CRIVELLI, S. Solar radiation and solar energy in Argentina. *Proc. Congr. The Sun in the Service of Mankind*. Paris: Unesco, 1973.

CURY-LUNARDI, D. M.; CATANEO, A. Estimativa da radiação solar global diária para Botucatu, *Científica*, São Paulo, v.22, p.117-121, 1994.

DAL PAI, A.; ESCOBEDO, J. F. Modelo de estimativa da radiação solar difusa instantânea. SIMPÓSIO EM ENERGIA NA AGRICULTURA, 1. Botucatu, *Anais...* Botucatu :UNESP/FCA, 1999, v.2, p.312-17.

DANTAS, R.T. *et al.* Determinação dos coeficientes da equação de Angstrom para estimativa da irradiação solar global em dois municípios da Paraíba. CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 11. REUNIÃO LATINO-AMERICANA DE

- AGROMETEOROLOGIA, 2. 1999, Florianópolis, *Anais...* Florianópolis. 1999. p.2399-2403, CD-ROM.
- IQBAL, M. *An introduction to solar radiation*. New York, Ed. Academic Press, 1983.
- JESUS, W. R.; CURY-LUNARDI, D. M. Estudo da variabilidade horária do número de horas de insolação no município de Botucatu. *Energia na Agricultura*, Botucatu, v. 2, nº 1, p.1-4. 1997.
- LAPERUTA FILHO, J. *Modelos horários para estimativa da Radiação solar global em Botucatu*. 1996. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu, 1996.
- LOPES, N.F. et al. Estimativa da radiação solar durante o ciclo vegetativo dos cereais no Rio Grande do Sul. Pelotas: Instituto de Pesquisa Agropecuária do Sul, Boletim Técnico, 1971. p.32.
- MARTINEZ-LOZANO, A.A. et al. The Historical evolution of the Ångström fórmula and its modifications: review and bibliography. *Agric. For. Meteorol.*, Amsterdam, v.33, p.109-128, 1984.
- OMETTO, J.C. *Estudo das relações entre radiação solar global, radiação líquida e insolação*. 1968. Tese (Doutorado) - Escola Superior de "Luiz de Queiróz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1968.
- OMETTO, J.C. *Bioclimatologia vegetal*. São Paulo, Editora Agrônoma Ceres, 1981.
- PRESCOTT, J.A. Evaporation from a water surface in relation to solar radiation. *Trans. R. Soc. S. Austr.*, Adelaide, v. 64, p.114-118, 1940.
- REIS, A.C.S. et al. Estimativa da energia solar global na área de Recife, baseada em registros de insolação. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.8, p.177-179, 1973.
- RIBEIRO, A.M. de A. *Estudo das relações entre radiação solar global (Q<sub>g</sub>) e razão de insolação (n/N) em algumas regiões do Brasil*. 1980. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiróz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1980.
- RICIERI, P. R. et al. Relações das radiações solar difusa e global em Botucatu. CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 1996, Campos do Jordão. *Anais...* Campos do Jordão: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 1996. p.547-50.
- RICIERI, R. P. *Modelos de estimativa e avaliação dos métodos de medida da radiação solar difusa*. 1998. Tese (Doutorado) - Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Botucatu, 1998.
- SANTOS, R. et al. Estimativa da Radiação solar global em Jaboticabal, SP. *Científica*, São Paulo, v.11, p.31-9, 1983.
- SOUZA, M. J. H. de.; ALVES, A. R. Avaliação de modelos para estimar a irradiância solar direta diária em duas localidades do Estado de Minas Gerais. *Rev. Bras. Agrometeorol.*, Jaboticabal, v. 16, n. 4, p.1-4, 1997.
- TEIXEIRA, A. H. de C. Relação entre a radiação solar global e insolação no município de Petrolina- PE.. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA 12, 1999, Florianópolis. *Anais...* Florianópolis, 1999. p. 798-802. CD-ROOM.
- TUBELIS, A. *Meteorologia descritiva: fundamentos e aplicações brasileiras*. São Paulo: Ed. Nobel, 1988.
- TUBELIS, A., NASCIMENTO, F.J.L. *Meteorologia descritiva*. São Paulo: Ed. Nobel, 1992.
- VALIATI, M. I. et al. Modelo de Estimativa da irradição Solar global para região de Cascavel. SIMPÓSIO EM ENERGIA NA AGRICULTURA, 1. Botucatu, *Anais...* Botucatu: UNESP/FCA, 1999, v.2, p.395-402.

Received on November 12, 2003.

Accepted on September 03, 2004.