

ISSN 0104-1347

Coeficientes da equação de Angström-Prescott para estimativa da insolação para Piracicaba, SP

Angström-Prescott coefficients for estimatives of the hours of sunshine for Piracicaba, SP, Brazil

Flávio Favaro Blanco¹ e Paulo Cesar Sentelhas²

Resumo - A estimativa de elementos meteorológicos a partir de medições realizadas em estações meteorológicas convencionais e automáticas é de grande utilidade quando não se dispõe de equipamentos que permitam obter a medição direta da variável desejada. O objetivo do presente trabalho foi determinar os coeficientes a e b da equação de Angström-Prescott para Piracicaba, SP. Utilizou-se medidas da radiação solar global e número efetivo de horas de brilho solar correspondentes a uma série de dados de quatro anos, obtidos em uma estação meteorológica convencional e automática, os quais foram organizados a fim de se obter a e b na escala anual, mensal e sazonal. A partir dos resultados obtidos, concluiu-se que a estimativa da insolação a partir dos valores anuais de a e b é satisfatória, sendo $a = 0,231$ e $b = 0,500$ o que resultou na estimativa da insolação com precisão de 89% e exatidão de 97%.

Palavras-chave: climatologia, estação meteorológica automática, radiação solar

Abstract - Estimating meteorological elements from conventional and automated meteorological stations measurements is particularly useful when equipments for measurements of the desired variable are not available. The aim of this study was to determine the coefficients a and b of the Angström-Prescott equation for Piracicaba, SP, Brazil. Data of four years of daily incoming solar radiation and sunshine hours (n) were used. These observed data were measured in a conventional weather station and an automated station, and were organized in order to obtain a and b values on annually, monthly and seasonally scales. From the results, we concluded that the estimative of n from annually values of a and b is satisfactory, ($a=0.231$ and $b=0.500$), which resulted in a estimation of n with precision of 87% and accuracy of 97%.

Key words: climatology, automatic weather station, solar radiation

Introdução

A radiação solar é a principal fonte de energia para o ambiente, sendo responsável pela fotossíntese e, conseqüentemente, pela produção das plantas cultivadas. Além disso, é também de grande importância em estudos ecológicos e ambientais, sendo o principal fator condicionante da temperatura do ar e do solo e dos processos de evaporação e transpiração (PEREIRA et al., 2002).

A medida da radiação solar, durante muito tempo, foi difícil e onerosa ou por utilizar equipamentos baseados em princípios mecânicos ou por empregar equipamentos baseados nos princípios da microeletrônica, de alto custo, o que restringia sua utilização à área de pesquisa. Na tentativa de contornar esses problemas, métodos de estimativa foram propostos a partir de variáveis facilmente medidas em estações meteorológicas convencionais, como a insolação, também conhecida como número efetivo de horas de brilho solar.

¹Eng. Agr^o, M.Sc., aluno de Doutorado em Irrigação e Drenagem, Depto. de Engenharia Rural, ESALQ/USP. Av. Pádua Dias 11, 13418-900, Piracicaba, SP. E-mail: ffblanco@carpa.ciagri.usp.br.

²Eng. Agr^o, Dr., Professor Depto. Ciências Exatas, ESALQ/USP. E-mail: pcsentel@carpa.ciagri.usp.br.

Diversas relações empíricas foram desenvolvidas para se estimar a radiação solar global (Q_g) a partir de medidas do número efetivo de horas de brilho solar. ANGSTRÖN (1924) apresentou uma equação em que o quociente entre Q_g e a radiação extra-terrestre (Q_0), Q_g/Q_0 , foi linearmente correlacionado com o quociente do número de horas de brilho solar (n) pela insolação máxima possível (N), sendo os coeficientes angular e linear dependentes da fração de Q_g em um dia inteiramente encoberto por nuvens. PRESCOTT (1940) simplificou essa equação de modo que os coeficientes linear (a) e angular (b) pudessem ser obtidos a partir de ajustes estatísticos, sendo este método denominado de Angström-Prescott e descrito pela equação:

$$Q_g = Q_0 \cdot \left(a + b \cdot \frac{n}{N} \right) \quad (1)$$

sendo Q_g e Q_0 dados em $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ e N e n em $\text{h} \cdot \text{d}^{-1}$. Um outro método foi proposto por Black (1956), citado por ROSENBERG (1974), que verificou que a relação entre a radiação solar incidente na superfície terrestre (Q_g) e a radiação no topo da atmosfera (Q_0) apresentava relação quadrática com a nebulosidade média mensal.

O método de Angström-Prescott se tornou o mais empregado, sendo que os valores dos coeficientes a e b , característicos de um determinado local, são dependentes da latitude, da época do ano e da altitude. GLOVER & McCULLOCH (1958) verificaram, ao analisar dados das relações Q_g/Q_0 e n/N em vários locais, que o valor de a é dependente da latitude ($a = 0,29 \cdot \cos \phi$), sendo ϕ a latitude do local, enquanto b assume um valor médio igual a 0,52. RIETVELD (1978), também analisando dados de várias partes do mundo, verificou que os coeficientes a e b estão relacionados ao valor médio da razão n/N , sendo esta relação linear para a e hiperbólica para b .

No Brasil, o método de Angström-Prescott vem sendo largamente utilizado. RIBEIRO (1980) determinou os valores de a e b para 32 estações meteorológicas localizadas entre 3° e 32° de latitude sul; o valor de a variou de 0,15 a 0,31 com tendência de redução com o aumento da latitude, enquanto o valor de b variou de 0,22 a 0,63 havendo tendência de redução do valor desse coeficiente com o aumento da latitude até 20° , sendo que a partir dessa latitude, b aumentou. CAMPELO JUNIOR (1998) verificou que o valor de a foi praticamente constante ao longo do ano, com valor de 0,21 e b variou de 0,26 a 0,54,

sendo que os maiores valores ocorreram no período de novembro a março e os menores de abril a agosto, para Santo Antônio do Leverger, MT. Diversos trabalhos podem ser encontrados na literatura apresentando os valores desses coeficientes para um grande número de localidades (CERVellini et al., 1966; OMETTO, 1968; ALVES et al., 1981; AZEVEDO et al., 1981; FONTANA & OLIVEIRA, 1996; AGUIAR et al., 1999)

Atualmente, com o desenvolvimento e difusão da microeletrônica, as estações meteorológicas automáticas passaram a se disseminar, contando com sensores para a medida direta da radiação solar global. No entanto, essas estações raramente contam com sensores para medida da insolação que, em muitas situações, são importantes, especialmente para estudos agro-ecológicos. Assim, a equação de Angström-Prescott continua sendo extremamente útil, agora para se estimar a insolação (n) a partir de medidas de Q_g .

Desse modo, o objetivo deste trabalho foi determinar os coeficientes a e b da equação de Angström-Prescott para Piracicaba, SP, na escala anual, mensal e sazonal, para a estimativa de n utilizando-se dados de Q_g obtidos em uma estação meteorológica automática.

Material e Métodos

Foram utilizados os dados do posto meteorológico do Departamento de Ciências Exatas da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", USP, a qual está situada nas seguintes coordenadas geográficas: $22^\circ 42' 30''$ de latitude sul, $47^\circ 38' 00''$ de longitude oeste e 546 m de altitude, que conta com uma estação convencional e outra automática.

Os dados de Q_g e n , obtidos a partir de piranômetro conectado a uma estação meteorológica automática (EMA) e heliógrafo instalado na estação convencional (EMC), correspondentes a uma série de quatro anos de medidas (de junho de 1996 a maio de 2000), foram ordenados de três diferentes formas: i) anualmente, ii) mensalmente e iii) sazonalmente. Para a ordenação por estações do ano, os períodos de verão, outono, inverno e primavera corresponderam às datas de 21/12 a 20/03, 21/03 a 21/06, 22/06 a 22/09 e 23/09 a 20/12, respectivamente.

Foram determinados os coeficientes a e b da equação de Angström-Prescott (PRESCOTT, 1940)

para cada mês e para cada estação do ano, bem como seus valores médios anuais, utilizando-se a análise de regressão linear, cuja finalidade é se estimar n a partir de Q_g , como mostra a equação (2):

$$n = \frac{N}{b} \cdot \left(\frac{Q_g}{Q_o} - a \right) \quad (2)$$

$$\text{Se } a > \frac{Q_g}{Q_o} \Rightarrow n = 0$$

Para o teste dos coeficientes obtidos, foram estimados os valores de n a partir de dados independentes de Q_g obtidos na EMA, no período de junho de 2000 a maio de 2002, utilizando-se os coeficientes a e b anuais, mensais e sazonais. A comparação dos dados observados e estimados foi feita graficamente e por meio da análise de regressão, do coeficiente de determinação (r^2) e do índice de concordância de Willmott, d (WILLMOTT, 1981) e do erro quadrado médio. Os valores de n estimados com os coeficientes anuais obtidos foram comparados com aqueles estimados quando se utilizaram os coeficientes de OMETTO (1968), CERVellini et al. (1966) e GLOVER & McCULLOCH (1958).

Resultados e Discussão

Na Tabela 1 observa-se que os valores dos coeficientes a e b variaram de acordo com os meses e épocas do ano, com a variando de 0,169 em outubro a 0,266 em março e b variando de 0,443 em março a 0,586 em outubro. Os maiores valores de a para as épocas de verão/outono mostram que, para um dia completamente nublado, a transmissividade da atmosfera é maior do que nos meses de inverno/primavera, provavelmente devido à redução na massa ótica e na quantidade de aerossóis. De um modo geral, o valor do coeficiente de determinação (r^2) foi menor no inverno, o que pode ser atribuído às dificuldades de se estabelecer uma relação única entre radiação e insolação para dias em que a radiação solar direta é intermitente e dias em que ela é contínua, como em alguns dias de inverno.

Para o período anual, CERVellini et al. (1966), utilizando três anos de dados de Q_g e n de Piracicaba, encontraram valores de a e b igual a 0,18 e 0,62, respectivamente, os quais diferem bastante

daqueles obtidos neste estudo. OMETTO (1968) encontrou valores de a e b de 0,26 e 0,51, respectivamente, utilizando dados de insolação da EMC e de radiação solar global provenientes de um piranômetro Eppley, correspondentes ao período de setembro de 1966 a agosto de 1967. Os valores destes coeficientes determinados neste estudo foram, respectivamente, 11% e 2% menores do que os apresentados por OMETTO (1968), o que pode estar relacionado ao maior período de anos utilizados (4 anos) e às diferenças entre os sensores de medida de Q_g .

A avaliação dos coeficientes obtidos mostrou haver precisão e exatidão semelhantes na estimativa de n para os diferentes valores de a e b . O método de Angström-PreScott subestimou o valor da insolação em 4,2%, 3,5% e 4,1%, respectivamente, quando se utilizaram os coeficientes a e b anuais, mensais ou sazonais (Figura 1). Alguns valores (4,7%, 3,7% e 4,7% do total) de n estimados resultaram em valores negativos, sendo estes considerados igual a zero, aumentando a dispersão dos dados. Um outro fator que também interfere nesses resultados é a espessura das nuvens, o que faz com que para um mesmo valor de n haja valores diferentes de Q_g .

O valor de r^2 , que expressa a precisão da estimativa de n quando se utilizaram os valores de a e b anuais, mensais e sazonais foi de 0,890, 0,885 e 0,887, portanto, sem diferença. A exatidão da

Tabela 1. Valores dos coeficientes a e b da equação de Angström-PreScott para a estimativa da insolação em Piracicaba, SP, para os diferentes meses e épocas do ano e média anual, com os respectivos coeficientes de determinação.

Período	a	b	r^2
Jan	0,254	0,511	0,841
Fev	0,247	0,507	0,907
Mar	0,266	0,443	0,825
Abr	0,232	0,504	0,871
Mai	0,261	0,475	0,860
Jun	0,213	0,544	0,875
Jul	0,244	0,448	0,626
Ago	0,228	0,498	0,899
Set	0,174	0,537	0,808
Out	0,169	0,586	0,922
Nov	0,231	0,517	0,940
Dez	0,233	0,506	0,790
Verão	0,259	0,477	0,843
Outono	0,239	0,502	0,874
Inverno	0,214	0,496	0,758
Primavera	0,203	0,547	0,901
Anual	0,231	0,500	0,844

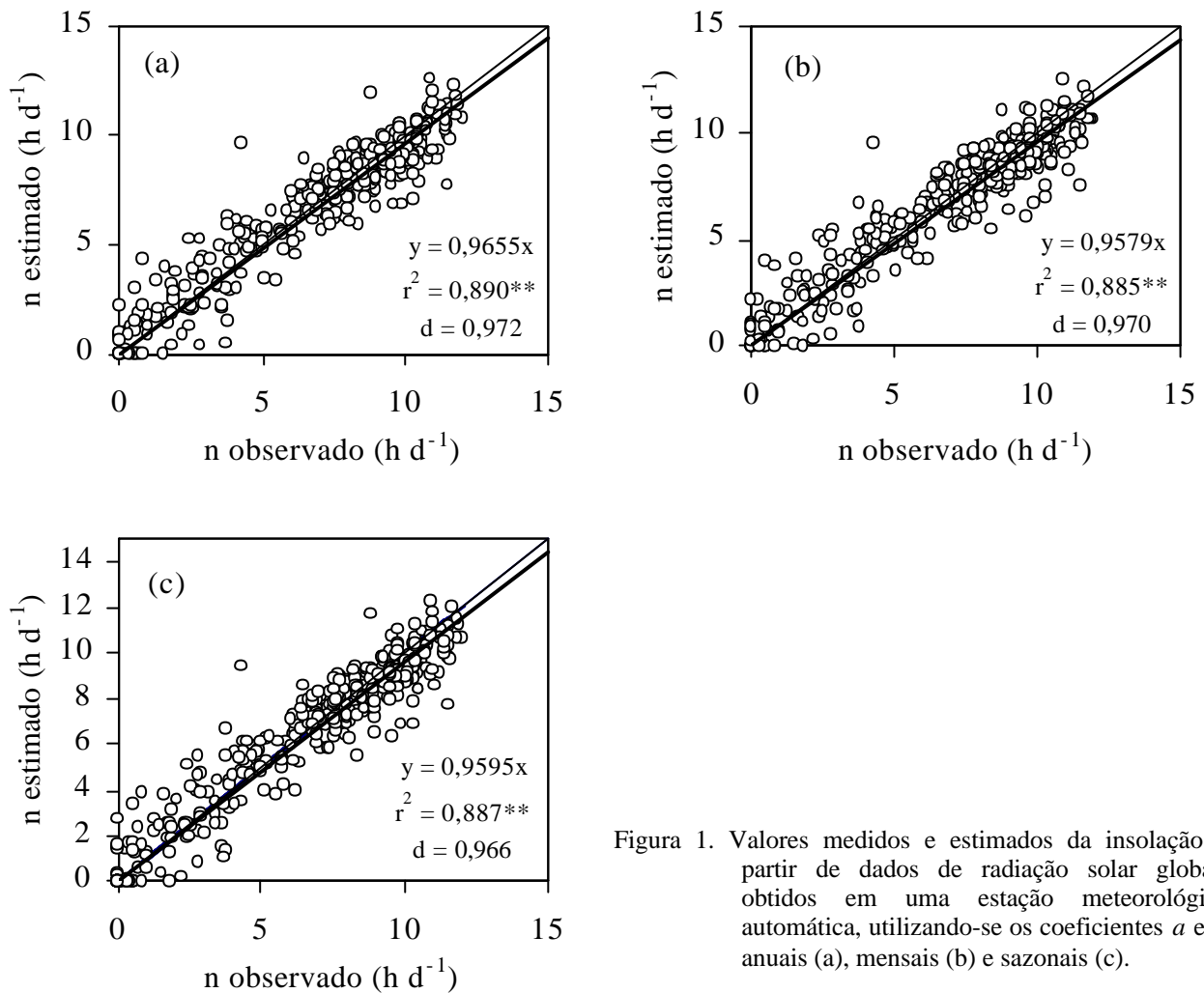


Figura 1. Valores medidos e estimados da insolação a partir de dados de radiação solar global, obtidos em uma estação meteorológica automática, utilizando-se os coeficientes a e b anuais (a), mensais (b) e sazonais (c).

estimativa, dada pelo índice de concordância de Willmott (d), também apresentou valores semelhantes, sendo este de 0,972, 0,970 e 0,966, respectivamente (Figura 1). Os valores mensais de r^2 e d praticamente não apresentaram variação para as estimativas utilizando os coeficientes anuais e mensais (Figura 2). O menor valor de r^2 foi de 0,805 para o mês de abril, sendo o maior de 0,946 em agosto. Os valores de d foram semelhantes, embora os coeficientes anuais tenham resultado em valores de d ligeiramente mais elevados em alguns meses. O menor valor de d observado para os coeficientes mensais foi de 0,953 em janeiro, sendo o maior de 0,982 em agosto. Para os coeficientes anuais, d variou de 0,955 em janeiro a 0,980 em dezembro.

Utilizando-se outros valores de a e b , como os de OMETTO (1968), CERVellini et al. (1966)

e os obtidos pelo método de GLOVER & McCULLOCH (1958), verifica-se maiores valores de r^2 e valores de d inferiores aos obtidos com os coeficientes determinados no presente estudo (Figura 3), o que indica a menor precisão da estimativa.

Segundo WILLMOTT (1981) a análise individual dos gráficos de dispersão não é suficiente para se verificar o grau e tipo de influência que o erro exerce na habilidade do método em prever uma dada variável. Esse autor sugere que pelo menos os erros descritos pela raiz quadrada do erro quadrado médio (REQM), do erro quadrado médio sistemático (REQMs) e aleatório (REQMa), assim como o índice de concordância (d), deveriam ser calculados e apresentados pois são adequados e necessários para a interpretação e validação das predições de um modelo. Quando um modelo apresenta REQM composto na

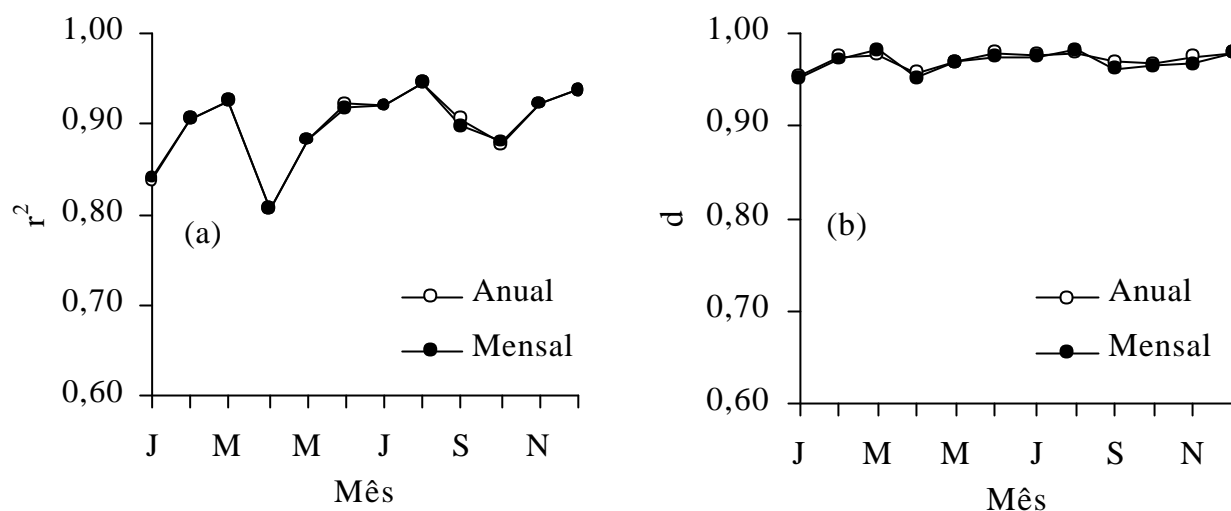


Figura 2. Coeficiente de determinação, r^2 (a) e índice de concordância, d (b), para a estimativa da insolação a partir da radiação solar global (Q_g) obtidos em estação meteorológica automática, utilizando-se os valores mensais e anuais dos coeficientes a e b .

maior parte pelo erro aleatório (REQMa), então esse é tido como adequado, ou seja, o REQMs deve ser minimizado para que o modelo possa prever uma variável com máxima acurácia.

A estimativa de n utilizando os coeficientes de GLOVER & McCULLOCH (1958) foi a que apresentou maior valor do erro quadrado médio (EQM) e, conseqüentemente, de REQM, embora os coeficientes de CERVellini et al. (1966) e OMETTO (1968) tenham apresentado erro sistemático mais elevado que os demais (EQMs igual a 49% e 44% de EQM, respectivamente). A melhor relação EQMs/EQM foi obtida para a estimativa ~~utilizando os valores de~~ a e b obtidos no presente trabalho, sendo esta de apenas 0,16; com isso, a maior parte do EQM foi composta pelo erro aleatório, o qual correspondeu a 84% de EQM, satisfazendo as exigências descritas por WILLMOTT (1981).

Conclusões

Os resultados obtidos mostram existir variação nos valores dos coeficientes da equação de Angström-PreScott ao longo do ano, porém não havendo diferença significativa na exatidão e na precisão das estimativas quando são empregados os valores mensais, sazonais ou anuais para a estimativa de n . Os valores de $a=0,231$ e $b=0,500$ obtidos nesse estudo resultaram em estimativas de n mais precisas

do que aquelas realizadas utilizando-se esses coeficientes obtidos por outros autores.

Referências Bibliográficas

- AGUIAR, J.V. et al. Estimativa da radiação solar a partir da insolação, na região metropolitana de Fortaleza, CE. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 11, Florianópolis, 1999. CD-ROM. Florianópolis: SBA, 1999.
- ALVES, A.R. et al. Estimativa da radiação solar global diária a partir de dados de insolação, para Viçosa, Minas Gerais. *Experientiae*, Viçosa, v. 27, n. 10, p. 211-222, 1981.
- ANGSTRÖM, A. Solar and terrestrial radiation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, London, v. 50, p. 121-126, 1924.
- AZEVEDO, P.V.; VAREJÃO-SILVA, M.A.; VARGAS, G.A.O. **Zoneamento do potencial de energia solar no nordeste**. Campina Grande: UFPB/NMA, 1981. 80 p.
- CAMPELO JUNIOR, J.H. Relação sazonal entre radiação solar global e insolação no sudoeste da Amazônia. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v. 6, n. 2, p. 193-199, 1998.
- CERVellini, A.; SALATI, E.; GODOY, H. Estimativa da distribuição de energia solar no estado de São Paulo. *Bragantia*, Campinas, v. 25, n. 3, p. 31-40, 1966.
- FONTANA, D.C.; OLIVEIRA, D. Relação entre radiação solar global e insolação para o estado do Rio Gran-

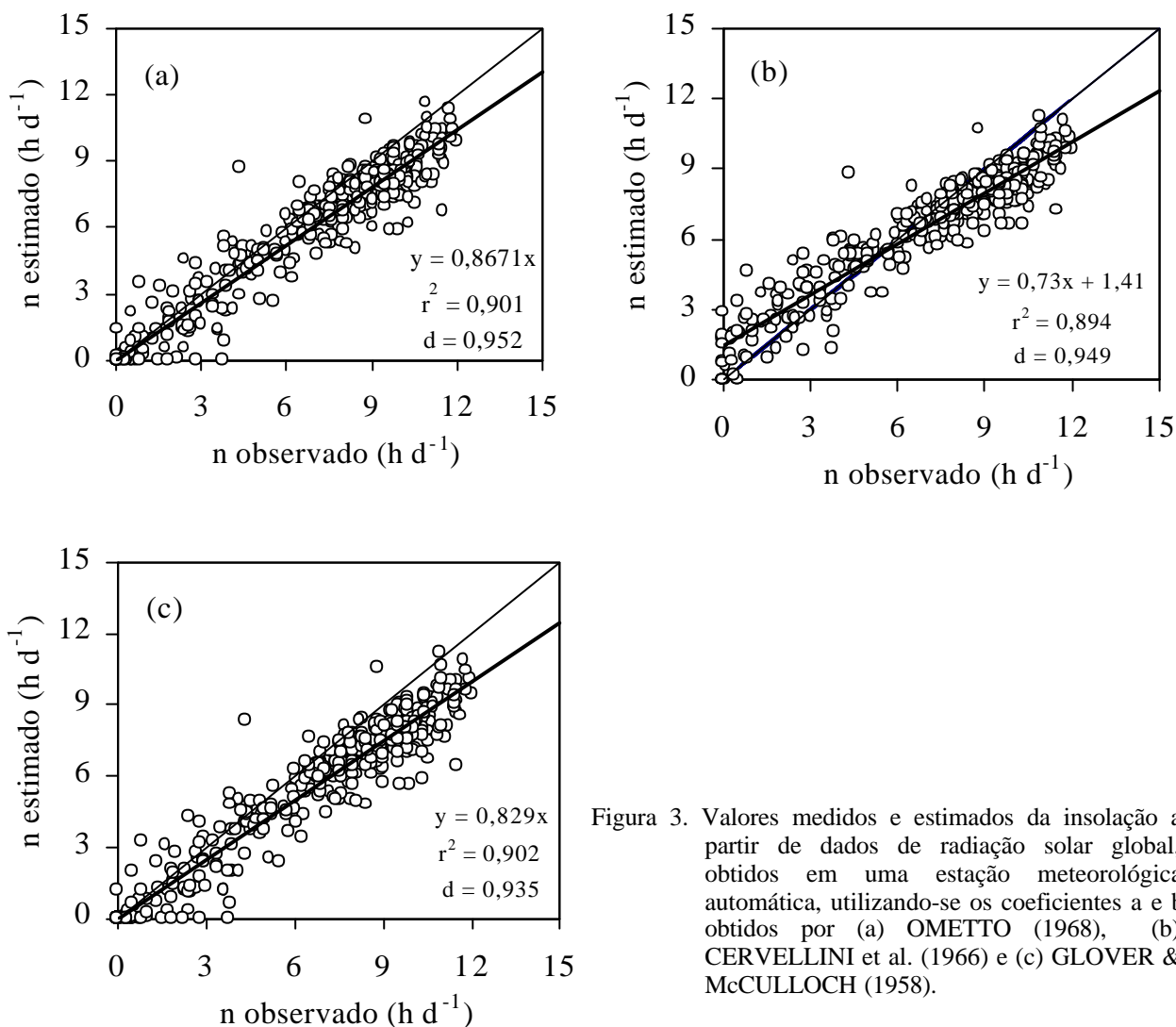


Figura 3. Valores medidos e estimados da insolação a partir de dados de radiação solar global, obtidos em uma estação meteorológica automática, utilizando-se os coeficientes a e b obtidos por (a) OMETTO (1968), (b) CERVellini et al. (1966) e (c) GLOVER & McCULLOCH (1958).

de do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 4, n. 1, p. 87-91, 1996.

GLOVER, J.; McCULLOCH, J.S.G. The empirical relation between solar radiation and hours of sunshine. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, London, v. 84, n. 360, p. 172-175, 1958.

OMETTO, A. **Estudo das relações entre radiação solar global, radiação líquida e insolação**. Piracicaba: USP, 1968. 64 p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 1968.

PEREIRA, A.R.; ANGELOCCI, L.R.; 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 Science Australian**, Adelaide, v. 64, p. 114-118, 1940.

RIBEIRO, A.M.A. **Estudo das relações entre radiação global (Q_g) e razão de insolação (n/N), em algumas regiões do Brasil**. Piracicaba, 1980. 88 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 1980.

RIETVELD, M.R. A new method for estimating the regression coefficients in the formula relating solar radiation to sunshine. **Agricultural Meteorology**, Amsterdam, v. 19, n. 3, p. 243-252, 1978.

ROSENBERG, N.J. **Microclimate: the biological environment**. New York: John Wiley & Sons, 1974. 315 p.

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

