



XIX Congresso Brasileiro de Agrometeorologia

23 a 28 de agosto de 2015

Lavras – MG – Brasil

Agrometeorologia no século 21:

O desafio do uso sustentável dos biomas brasileiros

Modelagem da irradiação solar global usando RNAs e o modelo de Angstrom-Prescott (estudo de caso em Botucatu-São Paulo)



Maurício Bruno Prado da Silva¹; Sílvia Helena Modenese Gorla da Silva²; Cícero Manoel dos Santos³; João Francisco Escobedo⁴; Enzo Dal Pai⁵.

¹Agrônomo, mestrando em Irrigação e Drenagem, FCA-UNESP, Fone: (14) – 3880-7585, mauricio.prado19@hotmail.com

²Tec. em processamento de dados, Doutora em Energia na agricultura, Professor assistente, Unidade de Registro – UNESP

³Físico, doutorando em Irrigação e Drenagem, FCA-UNESP

⁴Físico, Doutor em Física, Professor adjunto III, FCA-UNESP

⁵Agrônomo, Doutor em Energia na Agricultura, Professor substituto, FCA-UNESP

RESUMO: A radiação solar é uma das variáveis meteorológicas mais requisitadas em estudos agroambientais. Medidas da irradiação solar global (H_G) em muitas localidades são imprescindíveis, mas não estão disponíveis devido ao alto custo de aquisição dos sensores de monitoramento. Diversos métodos são utilizados para estimar H_G . Neste trabalho o modelo de Angstrom-Prescott (A-P) é comparado com modelos de Redes Neurais Artificiais (RNAs) na estimativa de H_G . Os dados utilizados de H_G e brilho solar foram obtidos da estação meteorológica localizadas na Faculdade de Ciências Agrônomicas (FCA) da Universidade Estadual Paulista (UNESP) (22,85°S; 48,43°W e alt. de 786 m). Foram considerados anos típicos e atípicos meteorológicos, obtidos a partir da série climática, para validação dos modelos. Os indicativos estatísticos de comparação de modelos foram: Mean Bias Error (MBE), relative Mean Bias Error (rMBE, %), Root Mean Square Error (RMSE), relative Root Mean Square (rRMSE, %) e o índice de concordância de Willmott (d). Os coeficientes do modelo de A-P foram, respectivamente, $a = 0,253$ e $b = 0,465$. A validação com o ano típico gerou coeficiente de determinação (R^2) de 0,888 com A-P e $R^2 = 0,854$ com RNAs. As estimativas de H_G mostram tendência semelhante entre os métodos. Considerando o ano típico na validação, o modelo de A-P obteve melhor desempenho (MBE = $-0,519 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, RMSE = $2,282 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ e $d = 0,963$) e o modelo de RNAs (MBE = $-2,447 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, RMSE = $3,541 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ e $d = 0,911$) desempenho inferior. As duas técnicas dão resultados bons ($10\% \leq \text{rRMSE} < 20\%$) e podem ser utilizadas na estimativa de H_G , com desempenho superior para o modelo de A-P. a validação dos modelos com ano típico e atípico foi satisfatória e representa uma metodologia eficiente.

PALAVRAS-CHAVE: Modelagem, equação de Angstrom-Prescott, RNAs

MODELING OF GLOBAL SOLAR IRRADIATION USING ANNs AND THE MODEL OF ÅNGSTRÖM-PRESCOTT (CASE STUDY IN BOTUCATU, SÃO PAULO)

ABSTRACT: Solar radiation is one of the most sought meteorological variables in agri-environmental studies. Measures of global solar irradiation (H_G) in many localities are essential, but are not available due to the high cost of acquisition of monitoring sensors. Several methods are used to estimate H_G . In this paper the performance of the Angstrom-Prescott model (A-P) is compared with Artificial Neural Networks (ANNs) models in the estimation of H_G . The used data of H_G and insolation were obtained from the weather station located at the College of Agricultural Sciences (FCA) of the Universidade Estadual Paulista (UNESP) (22.85°S; 48.43°W; 786 m). Were used typical and atypical weather years, obtained from the climatic series, for validate the models. The statistical index used in the comparison of models were: Mean Bias Error (MBE), relative Mean Bias Error (rMBE, %), Root Mean Square Error (RMSE), relative Root Mean Square Error (rRMSE, %) and Willmott's Index of Agreement (d). The A-P model coefficients are, respectively, $a = 0,253$ and $b = 0,465$. Validation with the typical year generated

O desafio do uso sustentável dos biomas brasileiros

coefficient of determination (R^2) of 0,888 with A-P and 0,854 with ANNs. The two methods show similar trend when estimating H_G . Considering the typical year in the validation, the A-P model presented the better performance (MBE = -0,519 MJ m⁻² day⁻¹, RMSE = 2,282 MJ m⁻² day⁻¹ and $d = 0,963$) in relationship to the ANNs model (MBE = -2,447 MJ m⁻² day⁻¹, RMSE = 3,541 MJ m⁻² day⁻¹ and $d = 0,911$). The two techniques provide good results ($10\% \leq rRMSE < 20\%$) and can be used to estimate H_G with superior performance for the A-P model. the validation of models with typical and atypical year was satisfactory and is an efficient methodology.

KEYWORDS: Modeling, Angstrom-Prescott equation, ANNs

INTRODUÇÃO

Medidas consistentes e disponíveis de radiação solar são de fundamental importância em estudos ligados à agricultura, energias renováveis, processos biológicos entre outros (Bosch et al., 2007). Contudo, muitas localidades não dispõem de sensores adequados e precisos para mensurar a irradiação solar global (H_G). Em virtude dos altos custos para aquisições de modernos sensores para monitoramento de H_G com qualidade. Além da escassez de técnicos especializados em lidar com esses equipamentos para realizar suas devidas calibrações.

Na necessidade de encontrar soluções para a falta de monitoramento de H_G , diversos pesquisadores têm publicado revisões que informam sobre diversas maneiras de como se obter estimativas de H_G através de modelos desenvolvidos para cada localidade específica (Martinez-Lozano, 1984; 2001; Bakirci, 2009). Dentre essas, destaca-se o prático e simples modelo estatístico linear de Angstrom-Prescott (A-P). Este modelo, mediante o ajuste local de seus coeficientes empíricos, utiliza o brilho solar como principal variável de entrada para estimativa de H_G . Contudo, atualmente vem-se utilizando bastante as técnicas de aprendizagem de máquinas (AMs). Em que as Artificial Neural Networks (ANNs) se destacam como uma técnica precisa na estimativa de H_G e em alguns estudos, essas técnicas vem demonstrando mais eficiência na estimativa de H_G do que o modelo de A-P (Linares-Rodríguez et al., 2011). Assim, o objetivo deste trabalho é averiguar e comparar o desempenho estatístico do modelo de A-P com os gerados pelas ANNs em Botucatu, São Paulo.

MATERIAIS E MÉTODOS

A área de estudo (estação de radiometria solar) está localizada na unidade acadêmica da Faculdade de Ciências Agrárias (FCA) da Universidade Estadual Paulista (UNESP), no município de Botucatu (22,85°S; 48,43°W e altitude de 786 m), situado na região Centro-Sul do Estado de São Paulo. O clima é temperado quente (mesotérmico) com verão quente e úmido (dezembro-fevereiro) e inverno frio e seco (junho-agosto) (Teramoto e Escobedo, 2012; Dal Pai, 2014). (Teramoto e Escobedo, 2012). A irradiação solar global (H_G) foi monitorada por um piranômetro Eppley PSPe o brilho solar (n) foi monitorado por um heliógrafo *Campbell-Strokes*. Para aquisição dos dados foi utilizado um datalogger CR23X da Campbell Scientific operando na frequência de 1 Hz e armazenamento (médio) que armazena a cada 5 minutos em média. A série de dados de H_G e n corresponde a um período de 16 anos (1996-2011) de medidas em partição diária que foram divididas em anos típico e atípico para efeito de análises estatísticas mais detalhadas (que considera o intervalo de variação do desvio padrão da média, com o valor da irradiação média de cada ano) neste trabalho. Mais detalhes dessa metodologia em Escobedo et al. (2013). As estimativas de H_G foram obtidas através do modelo linear desenvolvido por Angstrom (1924) e ajustado posteriormente por Prescott (1940). Este modelo é descrito em detalhes na equação1:

$$(H_G/H_O) = a + b(n/N) \quad (1)$$

em que:

H_G : irradiação solar global incidente na superfície terrestre ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); H_O : irradiação solar global no topo da atmosfera ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); n : brilho solar em horas (comprimento do período diurno de insolação); N : fotoperíodo em horas (comprimento astronômico do período diurno); a : coeficiente que expressa a fração mínima de H_O que atinge a superfície da terra em dias completamente nublados (corresponde a componente difusa de H_G); b : coeficiente complementar ($a+b = H_G$) que expressa o máximo de H_O que pode chegar à superfície terrestre (Martinez-Lozano, 1984). Outros autores indicam que o coeficiente b representa não somente a taxa de transmissão de H_O quando a razão de insolação (n/N) tende a um, mas que se trata da componente direta de H_G (Hinrichsen, 1994).

Técnicas de Aprendizado de máquinas (AMs) para estimativas de H_G

As técnicas de aprendizagem de máquinas (AMs) empregam um princípio de inferência denominado de indução. Em que as conclusões gerais são obtidas a partir de um determinado conjunto de exemplos. Assim, a aprendizagem supervisionada é uma das principais abordagens da indução (Lorena et al., 2011 As Artificiais Neurais Networks (ANN's) ou Redes Neurais Artificiais (RNA's) são sistemas computacionais que se baseiam na estrutura, no método de processamento e na capacidade de aprendizagem do cérebro (Haykin, 1998). No presente trabalho, é utilizado o treinamento da RNA's com a Multilayer Perceptron (MLP), com o algoritmo *backpropagation* (Haykin, 1998) e termo *momentum*. As RNA's foram testadas e avaliadas através da ferramenta computacional de domínio publico WEKA (*Waikato Environment for Knowledge Analysis*), que consiste num conjunto de algoritmos de AMs livre, disponível em <http://www.cs.waikato.ac.nz/~ml/weka/> (Witten e Frank, 2005). Na Tabela 1 estão presentes os símbolos correspondentes às variáveis de entrada [irradiação solar global incidente no topo de atmosfera (H_O) e razão de insolação entre o brilho solar e o fotoperíodo (n/N)] do modelo desenvolvidos pela RNA para estimativa de H_G (variável de saída).

Tabela 26. Modelo desenvolvido pelas Redes Neurais Artificiais (RNA's) através das variáveis de entrada irradiação solar global incidente no topo da atmosfera (H_O) e razão de insolação (n/N).

ANN (MLP)	Variáveis de entrada
RNA	$H_O, n/N$

Índices estatísticos

Na avaliação do desempenho dos modelos ANN e foram utilizados: MBE (Mean Bias Error), Relative Mean Bias Error (rMBE), Root Mean Square Error (RMSE), Relative Root Mean Square Error (rRMSE) e d de Willmott (Willmott, 1981; Santos et al., 2014). Estes índices estatísticas permitem a detecção de subestimativa ou superestimativa, espalhamento ou tendência sistemática e ajustamento dos modelos.

$$\text{MBE} = \frac{\sum_{i=1}^{N'} (P_i - O_i)}{N'} \text{rMBE (\%)} = 100 \times \frac{\sum_{i=1}^{N'} (P_i - O_i)}{\bar{X}} \text{RMSE} = \left[\frac{\sum_{i=1}^{N'} (P_i - O_i)^2}{N'} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$rRMSE (\%) = 100 \times \frac{\left[\frac{\sum_{i=1}^{N'} (P_i - O_i)^2}{N'} \right]^{\frac{1}{2}}}{\bar{X}} d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N'} (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P'_i| + |O'_i|)^2}$$

em que: P_i representa os valores estimados de ETo por ANN, O_i os valores de ETo_{PMF-56}, $|P'_i|$ o valor absoluto da diferença $P_i - \bar{O}_1$, em que \bar{O}_1 representa a média de O_i , $|O'_i|$ representa o valor absoluto da diferença $O_i - \bar{O}_1$. \bar{X} é o valor médio medido e N' o número de observações. Diferentes intervalos de rRMSE são definidos para avaliar a acurácia dos modelos (Heinemann et al., 2012): Excelente se rRMSE < 10%; Bom se 10% ≤ rRMSE < 20%; Aceitável se 20% ≤ rRMSE < 30%; Pobre se rRMSE ≥ 30%. O valor de (rRMSE) é o índice conclusivo sobre o desempenho dos modelos neste estudo. Todos os cálculos estatísticos foram feitos no Microcal™ Origin 6.0®.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores dos coeficientes do modelo de AP ajustados para Botucatu estão dispostos na Tabela 2. Em que os valores das transmissividade mínima ($H_G/H_0 = a$) e máxima ($H_G/H_0 = a+b$) são respectivamente 25,3% e 71,8%. Tais valores, quando comparados aos determinados por Correa et al. (2012) com um conjunto de dados de 5 anos (2001-2005), mostram que as transmissividade mínima ($H_G/H_0 = a$) e máxima ($H_G/H_0 = a+b$) tendem a superestimar o modelo anual desenvolvido neste trabalho em 2,0% e 2,6%. A Figura 1 indica que há acréscimos nos valores da transmissividade (H_G/H_0) à medida que a razão de insolação (n/N) vai aumentando. Tal fato ocorre em decorrência da alteração das condições de nebulosidade ao longo do ano. Recentemente Teramoto e Escobedo (2012) investigaram a frequência anual das condições de céu em Botucatu. Estes autores concluíram que em Botucatu há elevada frequência de dias com condição de céu claro e baixo de céu nebuloso. E que há indícios da existência de aerossóis, oriundos da queima de cana-de-açúcar em municípios próximos a Botucatu, influenciando sobre as condições de céu (reduzindo a frequência de céu claro para a condição de céu parcialmente nebuloso com dominância para o claro). Contudo, a principal causa dessa variabilidade decorre em virtude dos efeitos da sazonalidade (através das estações do ano). Na comparação entre os modelos desenvolvidos neste trabalho, verifica-se que o modelo estatístico A-P ano típico (MBE = -0,519 MJ m⁻² dia⁻¹; rMBE = -2,982%; RMSE = 2,282 MJ m⁻² dia⁻¹; rRMSE = 13,109%; $d = 0,963$; $R^2 = 0,888$) se sobressai em relação aos demais modelos desenvolvidos. Em virtude do espalhamento dos valores de H_G^d (estimada) ser consideravelmente superior aos demais considerado bom (10% ≤ rRMSE < 20%;). Enquanto que o modelo ANN ano atípico (MBE = -2,447 MJ m⁻² dia⁻¹; rMBE = -14,053%; RMSE = 3,541 MJ m⁻² dia⁻¹; rRMSE = 20,339%; $d = 0,911$; $R^2 = 0,925$) foi o modelo de pior desempenho. Em decorrência de seu maior grau de dispersão. Sendo este considerado aceitável (20% ≤ rRMSE < 30%).

Tabela 27. Valores dos coeficientes a e b do modelo A-P para estimativa de H_G em Botucatu, SP.

Localidade	Botucatu	
Coeficientes A-P	a	b
	0,253	0,465

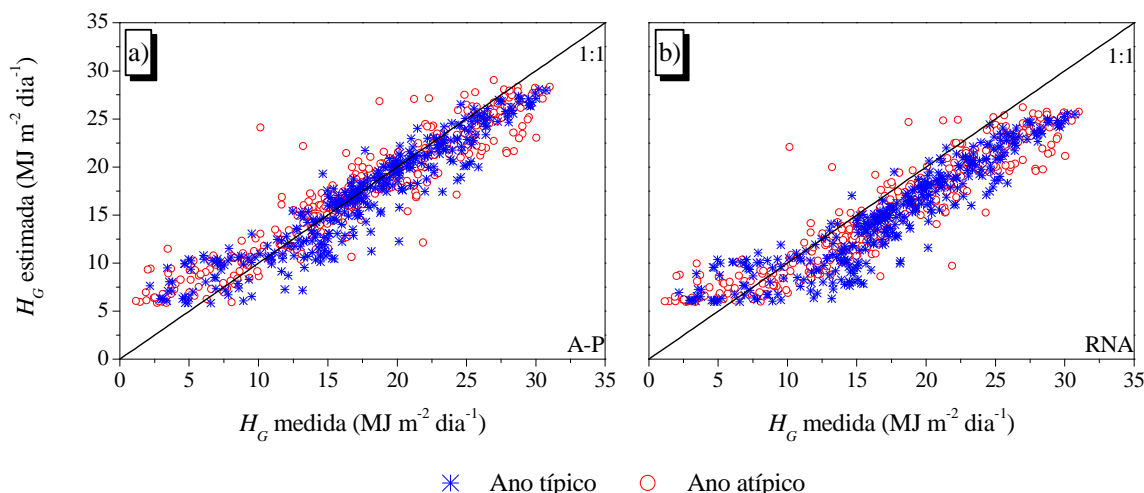


Figura 40. Dispersão dos valores estimados de H_G ano típico (asterisco azul) e ano atípico (círculo vermelho) correlacionados com H_G medida. (a) modelo de Angstrom-Prescott e (b) Rede Neural artificial (RNA).

Tabela 28. Desempenho dos modelos A-P e (típico e atípico) e das ANN (típico e atípico) para estimativa de H_G através de diferentes indicadores estatísticos.

Índices estatísticos	A-P		ANN	
	Ano típico	Ano atípico	Ano típico	Ano atípico
MBE ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$)	-0,519	0,189	-2,447	-1,827
rMBE (%)	-2,982	1,100	-14,053	-10,656
RMSE ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$)	2,282	2,688	3,541	3,410
rRMSE (%)	13,109	15,682	20,339	19,891
d	0,963	0,959	0,911	0,933
R^2	0,888	0,882	0,925	0,869

CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos na base de validação dos modelos, verificou-se que o modelo A-P ano típico se sobressaiu em relação aos demais modelos de estimativa de H_G . Desta maneira, pode-se concluir que A-P estima H_G em Botucatu com precisão e de forma simples e prática. Embora a



XIX Congresso Brasileiro de Agrometeorologia

23 a 28 de agosto de 2015

Lavras – MG – Brasil

Agrometeorologia no século 21:

O desafio do uso sustentável dos biomas brasileiros



utilização das RNA's seja bastante promissora e necessite de pesquisas mais aprofundadas para ajustes que levem a modelagens mais precisas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANGSTROM, A. Solar and terrestrial radiation. **Q. J. R. Met. Soc.**, v. 50, p. 121-125, 1924.

BAKIRCI, K. **Correlations for estimation of daily global solar radiation with hours of bright sun shine in Turkey.** Energy, v. 34, p.485-501, 2009.

ESCOBEDO J.F. Estimativa da irradiação solar direta na incidência norma (K_b) em função da transmissividade atmosférica (K_t) e razão de insolação (n/N). In: Avances em Energías Renovables y Medio Ambiente. V. 17, pp. 11.101-11.110, 2013.

HAYKIN, S. Neural networks: A comprehensive foundation. 2nd ed. Hamilton: **Prentice Hall**, 1998, 842p.

MARTÍNEZ-LOZANO, J. A. et al. The historical evolution of the Angstrom Formula and its modifications. In: Agricultural and Forest Meteorology, v.33, n.2-3, p. 109-128, 1984.

SANTOS, C. M. et al. **On modeling global solar irradiation using air temperature for Alagoas State, Northeastern Brazil.** Energy, v. 71, p. 388-398, 2014.

TERAMOTO, É. T.; ESCOBEDO, J. F. Análise da frequência anual das condições de céu em Botucatu, São Paulo. In: R. Bras. Agríc. Ambiental, v. 16, n.9, p. 985-992, 2012.

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