

RELAÇÕES ENTRE A RADIAÇÃO SOLAR E A EVAPORAÇÃO DE ÁGUA MEDIDA EM TANQUE CLASSE-A E EM ABRIGO TERMOMÉTRICO

José Carlos Ferreira¹, Claudio S. Vieira², Margarete A. L. Andrade³, Alexandre M. da Silva⁴, Gustavo Sobue⁵ e Vanessa Mieto Soares⁶

Resumo: O conhecimento da relação entre níveis de distribuição da energia na superfície do solo e os demais fatores ambientais serve como elemento básico para a caracterização do potencial energético de uma região. Na análise aqui proposta, usou-se uma série de dados de cinco anos de quatro variáveis meteorológicas, obtidos numa Estação Climatológica localizada em Sorocaba, SP. Os dados foram submetidos à análise estatística e comparativa. Os maiores valores de correlação foram entre a irradiância solar e a evaporação no abrigo termométrico (0,70) e entre as horas de abertura solar e a evaporação de superfície livre do Tanque Classe A (-0,51). O mês de fevereiro apresentou o maior nível de irradiância solar disponível e o mês de julho apresentou o menor nível. A análise sazonal de correlação entre as variáveis estudadas mostrou-se mais sensível do que a análise anual, com todos os índices de correlação no intervalo $0,8 < r \leq 0,9$. Considerando-se as demais variáveis dependentes da Irradiância Solar direta na superfície, o nível de $11,71 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ é a quantidade mínima para viabilizar o uso do potencial de energia solar para Sorocaba.

Palavras-chave: Energia solar. Irradiância. Aplicações Tecnológicas.

1 Introdução

A energia solar que atinge a superfície do solo é diretamente responsável pela maioria dos processos relacionados ao funcionamento dos ecossistemas e dos fenômenos climáticos (ODUM; BARRETT, 2008). Com a crescente demanda das emissões de gases ocasionadas pela queima de combustíveis fósseis, o homem vem buscando o aproveitamento de outras fontes de energia mais limpas, especificamente a solar.

Estudos sobre energia solar incidente na superfície da Terra são geralmente feitos usando dados obtidos diretamente por instrumentos apropriados a essa finalidade e por pessoal habilitado no uso e operações deles.

Contudo, o custo dos equipamentos para a aquisição desses dados torna-se elevado, o que dificulta em muito suas medidas. Para contornar essas dificuldades,

algumas equações empíricas foram deduzidas, a partir de modelos matemáticos que trabalham com dados de obtenção simplificada, por meios convencionais em estações meteorológicas. Com essa finalidade, na literatura pertinente, destaca-se a equação de Angstrom (1924), que mais tarde foi modificada por Prescott (1940):

$$R_g \cdot R_o^{-1} = a + b(n \cdot N^{-1}) \quad (1)$$

Onde:

Nessa equação, R_g é a radiação global; R_o a radiação solar direta numa superfície horizontal no topo da atmosfera, ambas em MegaJoule por metro quadrado por dia ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$); n é o número de horas de insolação na superfície estudada; N é o comprimento astronômico do dia; e "a" e "b" são parâmetros de regressão do modelo característico da transmitância atmosférica.

¹ NEPA - Núcleo de Estudos e Pesquisas Ambientais da Fatec-So – Sorocaba – SP.
E-mail: ferraro-1@hotmail.com

² E-mail: claudiosiqueira@ibest.com.br

³ E-mail: d_proj@fatecsorocaba.edu.br

⁴ E-mail: amsilva@sorocaba.unesp.br.

⁵ E-mail: Gustavo.sobue@nokia.com

⁶ E-mail: va.mietto@gmail.com

Para latitudes entre 0° e 60° e em locais onde a e b não são conhecidos, pode ser usada a equação: $a=0,29.\cos\phi$, sendo ϕ a latitude (GLOVER; MCCULLOCH apud IQBAL, 1983). Para esta faixa de latitude, considera-se ainda $b=0,52$.

No exterior, Prescott (1940) e Spencer (1982), respectivamente, realizaram estudos sobre a evaporação da água ocasionada por efeitos da radiação solar. No Brasil, há vários estudos regionais relacionados a estudos sobre medidas e aplicações da radiação solar. Exemplos de trabalhos são Gomes et al. (2007), que realizaram estudo com dados de Fortaleza/CE, Ometto (1968), Santos et al. (2003), Tubelis (1976) no estado de São Paulo, Souza e Alves (1997) em Minas Gerais; Martinazzo (2004) no Rio Grande do Sul.

Estudos climatológicos para a região de Sorocaba-SP ainda são escassos, destacando-se basicamente o trabalho de Goes e Ferreira (2006) os quais, trabalhando com série de dados de cinco anos de evaporação de água em Tanque Classe A, efetuaram balanço hídrico e avaliaram a disponibilidade de água para fins de planejamento em irrigação e distribuição urbana para Sorocaba.

O presente trabalho teve como objetivo efetuar, para o município de Sorocaba-SP, uma análise de dados médios mensais de evaporação de água associados a: 1) dados médios mensais de irradiância solar na superfície do solo e 2) a dados médios mensais do número de horas de insolação.

2 Material e métodos

2.1 Localização e caracterização ambiental da área de estudo

O município de Sorocaba situa-se entre as coordenadas UTM (fuso 23-S) 237.500 e 265.000 e 7.388.000 e 7.416.000 (Figura 1). Possui uma área de 449 km² e uma população de 552.194 habitantes. Trata-se de um município de grande importância no cenário sócio-econômico paulista e brasileiro, sendo responsável por

1,033% do PIB paulista, segundo a Fundação Seade (2009).

O clima da região é, segundo classificação de Köppen, do tipo "Cfa" (subtropical quente), tendo como temperatura média anual 21,4°C, máxima de verão igual a 30,1°C e mínima de inverno igual a 12,2°C e ainda 1.285 mm de altura pluviométrica anual (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, 2009). A direção predominante do vento é de sudeste e a intensidade média anual é de 10 km.h⁻¹.

2.2 Procedimentos e análise de correlação.

Foram utilizados dados diários de evaporação da água, utilizando-se um evaporímetro Piche e um tanque classe A, este último instalado sobre uma superfície gramada. Utilizaram-se, ainda, dados diários, correspondentes a horas de insolação, obtidos com um heliógrafo tipo Campbell-Stokes, gerados na Estação Climatológica Principal nº 83851 do INMet, instalada no Campus da Faculdade de Tecnologia de Sorocaba, numa altitude média de 550m, aproximadamente no cruzamento das coordenadas UTM (23S) 251.700 e 7.400.700 (Figura 2).

O quarto parâmetro utilizado correspondeu à base sobre dados diários de irradiância solar direta na superfície horizontal do solo, no período de 2003 a 2007 e estimada para Sorocaba por Cunha et al. (2008).

Os dados foram organizados em planilhas e submetidos a técnicas de análise de correlação. Considerando-se a correspondência sazonal das variáveis, utilizou-se a correlação entre médias de dados emparelhados para identificar o comportamento das variáveis estudadas. Para avaliar quantitativamente as correlações usou-se o critério da Tabela 1.

Inicialmente foram calculadas as médias mensais dos dados diários de cada uma das quatro variáveis, os respectivos desvios padrões e o coeficiente de variação para cada variável em cada mês. Posteriormente os dados foram analisados sazonalmente nos meses correspondentes ao verão, inverno, outono e primavera.

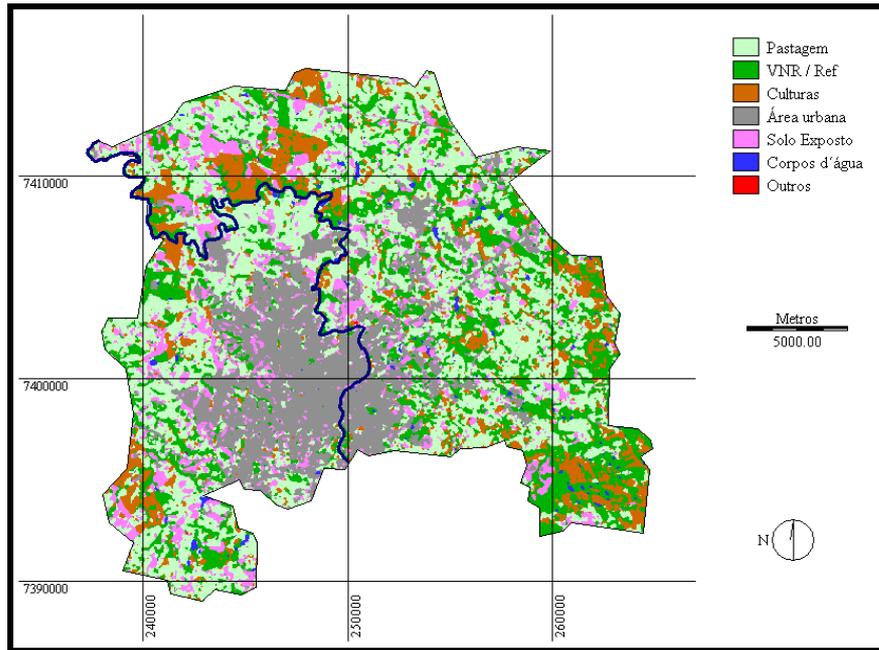


Figura 1 - Mapa de cobertura do solo para o município de Sorocaba-SP.
Fonte: Silva (2005).



Figura 2 - Evaporímetro de Piche instalado no abrigo termométrico (esquerda) e o Tanque Classe A e seus componentes sobre o gramado da estação climatológica.

Tabela 1 - Intervalos de valores absolutos do coeficiente de correlação.

$0,9 < r \leq 1,0$: forte	$0,8 < r \leq 0,9$: boa	$0,7 < r \leq 0,8$: moderada
$0,6 < r \leq 0,7$: mediana	$0,5 < r \leq 0,6$: fraca	$R \leq 0,5$: inadequada

Fonte: Milone (2004).

3 Resultados e Discussão

3.1 Análise anual das variáveis

A Tabela 2 apresenta os valores médios mensais anuais, obtidos para os quatro parâmetros estudados, bem como seus respectivos desvios padrões e o coeficiente de variação. Na Tabela 2 também é possível observar que a média de evaporação de água em superfície livre é menos de 5,0 mm.dia⁻¹, com uma média de incidência solar de cerca de 6 horas diárias. O total anual de evaporação estimado (aproximadamente 1500 mm), que foi obtido com o valor médio anual multiplicado pelo número de dias do ano, ficou de certa forma condizente com aquele estimado pelo Instituto Nacional de Meteorologia (2009), o

qual mostra um cartograma indicando que Sorocaba se situa na intersecção das faixas “900-1200” e “1200-1500” mm. ano⁻¹.

Nota-se, na série estudada, que junho e julho foram os meses com menor taxa de irradiância solar direta e que fevereiro foi o mês com maior nível de irradiação disponível. Verifica-se também que o maior coeficiente de variação apresentado corresponde à evaporação dentro do abrigo termométrico.

Observou-se maior valor dos coeficientes de variação nos dados de evaporação no abrigo termométrico. Isto se deve provavelmente por imprecisões de leitura na escala da coluna de água do evaporímetro. Os dados de irradiância apresentam uma flutuação em torno da média de 2,5 MJ.m⁻².dia⁻¹.

Tabela 2 - Valores médios mensais anuais de evaporação no abrigo termométrico (EA), evaporação no tanque (ET), horas de insolação (HI) e Irradiância solar (IS). DP – desvio padrão; CV (coeficiente de variação - %).

Meses	E.A. (mm)	E.T. (mm)	H.I. (h)	IR (MJ.m ⁻² .dia ⁻¹)
Jan	0,9	4,4	4,2	16,21
Fev	1,1	4,7	6,1	19,30
Mar	1,1	4,0	6,3	17,31
Abr	1,0	3,9	6,1	15,06
Mai	1,0	3,9	6,0	12,54
Jun	0,9	3,9	6,2	11,71
Jul	1,0	3,8	6,2	11,98
Ago	1,3	3,7	6,9	14,53
Set	1,5	3,6	6,2	15,84
Out	1,2	4,0	5,4	16,84
Nov	1,3	4,5	5,0	17,32
Dez	1,2	4,6	6,0	18,54
Média	1,1	4,1	5,9	15,60
DP	0,2	0,4	0,7	2,50
CV	0,18	0,09	0,12	0,16

A Figura 3 mostra o comportamento anual das médias mensais de evaporação no tanque (ET), evaporação no abrigo termométrico (EA), horas de insolação (HI) e Irradiância solar (IR) para o período estudado. É possível verificar que os níveis de irradiância solar de abril a agosto foram inferiores à média anual (15,6 MJ.m⁻².dia⁻¹). Observa-se que a partir de agosto há um aumento nos níveis de irradiância solar, atingindo o máximo no final do verão. Os valores dos níveis de evaporação do tanque (ET) e do abrigo (EA) mostraram-se coerentes, pois a evaporação no tanque (ET)

sempre foi maior que a evaporação no abrigo (EA) ao longo dos cinco anos estudados.

A partir de agosto os níveis de irradiância e horas de insolação passaram a variar em oposição, sugerindo forte correlação negativa entre essas duas variáveis e contrariando a expectativa de alta correlação positiva. Apesar de ser pouco comum este tipo de comportamento, sabe-se que, embora as horas de insolação tenham relação com a irradiância solar direta, elas podem ter sido reduzidas devido à presença de nuvens, aumento da nebulosidade em função da umidade (antecipação da estação das chuvas). Adicionalmente, sabe-se que as

horas de insolação diminuem com a umidade do ar (chuva e nuvens).

Observou-se valor médio de 5,9 horas diárias de abertura de sol e média anual de $15,6 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ de irradiância solar na superfície do solo, que pode servir como referencial no aproveitamento de energia solar em Sorocaba.

Em nenhum dos meses da série estudada, o nível médio de evaporação de água em superfície livre atingiu 5,0 mm e a média anual foi de 4,1 mm. No período estudado, observou-se que os níveis de irradiância solar diminuíram de março até junho, voltando a aumentar até dezembro em função da inclinação do eixo da Terra.

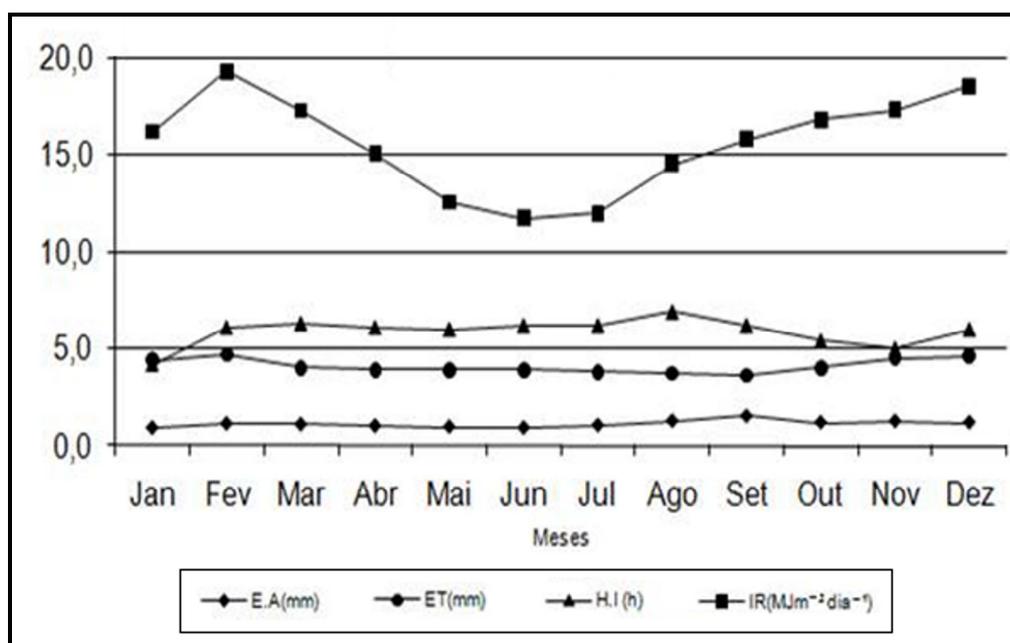


Figura 3 - Comportamento anual das médias mensais de evaporação no tanque (ET), evaporação no abrigo termométrico (EA), horas de insolação (HI) e Irradiância solar (IR) para o período estudado.

A Tabela 3 mostra os valores dos coeficientes de correlação entre as variáveis, onde $r_1=(HI \times IR)$, $r_2=(ET \times IR)$, $r_3=(EA \times IR)$,

$r_4=(HI \times ET)$ e $r_5=(HI \times EA)$, indicam as correlações das variáveis, duas a duas.

Tabela 3 - Valores dos coeficientes de correlação entre as variáveis

$r_1=(HI \times IR)$	$r_2=(ET \times IR)$	$r_3=(EA \times IR)$	$r_4=(HI \times ET)$	$r_5=(HI \times EA)$
-0,26	0,70	0,40	-0,51	0,25

Da Tabela 3, observa-se que as maiores correlações foram entre a radiação solar direta e a evaporação no tanque Classe A (moderada) e das horas de insolação com a evaporação no mesmo tanque (fraca). Os demais índices de correlação ficaram abaixo de 0,5 (impróprios).

3.2 Análise sazonal das variáveis

Para a análise sazonal, os dados foram reagrupados de acordo com os meses das estações do ano e foram calculadas as seguintes medidas: desvio padrão, média aritmética e coeficiente de variação para

cada variável. A Tabela 4 mostra os resultados das estatísticas de EA (mm), ET (mm), HI (horas) e IR ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$), nas respectivas estações do ano. Observa-se que do ponto de vista da evaporação da água no tanque classe A, o maior coeficiente de variação ocorre na primavera e os do interior do abrigo são sempre maiores que os do tanque, exceto na primavera.

Do ponto de vista da variação da irradiância solar direta ao longo do ano, observa-se que a maior variabilidade foi em outubro, enquanto que as menores foram no verão e na primavera. Do ponto de vista das horas de insolação, a maior variabilidade identificada foi no verão.

Tabela 4 - Valores dos níveis de EA, ET, HI e IR e respectivas estatísticas nas estações do ano.

Verão	EA (mm)	ET (mm)	HI (h)	IR (MJ.m ⁻² .dia ⁻¹)
Dez	1,20	4,60	6,00	18,50
Jan	0,90	4,40	4,20	16,20
Fev	1,10	4,70	6,10	19,30
DP	0,15	0,15	1,07	1,61
Média	1,07	4,57	5,43	18,00
CV	0,14	0,03	0,20	0,09

Outono	EA (mm)	ET (mm)	HI (h)	IR (MJ.m ⁻² .dia ⁻¹)
Mar	1,10	4,00	6,30	17,30
Abr	1,00	3,90	6,10	15,10
Mai	1,00	3,90	6,00	12,50
DP	0,06	0,06	0,15	2,40
Média	1,03	3,93	6,13	14,97
CV	0,06	0,01	0,02	0,16

Inverno	EA (mm)	ET (mm)	HI (h)	IR (MJ.m ⁻² .dia ⁻¹)
Jun	0,9	3,9	6,2	11,7
Jul	1,0	3,8	6,2	12,0
Ago	1,3	3,7	6,9	14,5
DP	0,21	0,10	0,40	1,54
Média	1,07	3,80	6,43	12,73
CV	0,20	0,03	0,06	0,12

Primavera	EA (mm)	ET (mm)	HI (h)	IR (MJ.m ⁻² .dia ⁻¹)
Set	1,5	3,6	6,2	15,8
Out	1,2	4,0	5,4	16,8
Nov	1,3	4,5	5,0	17,3
DP	0,15	0,45	0,61	0,76
Média	1,33	4,03	5,53	16,63
CV	0,11	0,11	0,11	0,05

A Tabela 5 mostra as estimativas dos valores dos coeficientes de correlação

entre os pares de variáveis, recalculados para cada estação do ano.

Tabela 5 - Coeficientes de correlação das variáveis nas respectivas estações do ano.

Estação	HI x IR	ET x IR	EA x IR	HI x ET	HI x EA
Verão	0,98	1,00	0,83	0,96	0,93
Outono	0,97	0,84	0,84	0,94	0,94
Inverno	1,00	-0,91	0,99	-0,87	0,97
Primavera	-1,00	0,97	-0,79	-0,97	0,97

Da análise dos índices de correlação da Tabela 5, verificou-se que existe no verão forte correlação positiva entre a irradiância solar direta e a evaporação da água no tanque classe A. Por outro lado, na mesma estação, o coeficiente de correlação entre a

irradiância solar direta e a evaporação da água no interior do abrigo foi 0,83. Também foram identificadas fortes correlações negativas no inverno entre a irradiância solar direta e a evaporação da água do tanque classe A. Os coeficientes de correlação

obtidos entre a irradiância solar e a taxa de evaporação no interior do abrigo foram altos e variam muito pouco ao longo das estações do ano, sendo ligeiramente menores que os coeficientes entre as horas de insolação e a evaporação da água no interior do abrigo. Verificou-se também que todos os índices de correlação entre as horas de insolação com as demais variáveis são fortes e positivas em todas as estações do ano. Foi ainda observado que a análise dos valores dos coeficientes de regressão da Tabela 5 mostra que eles são coerentes com a sequência dos dados da Tabela 2, os quais foram obtidos a partir dos dados experimentais diários coletados na estação climatológica.

4 Conclusões

Com base na análise dos resultados é possível fazer as afirmações que seguem.

A análise sazonal dos dados de evaporação de água na superfície do solo, por efeitos da ação da irradiância solar direta e do número de horas de insolação apresentou coeficientes de correlação maiores em relação à análise anual dos dados.

Com base nos resultados obtidos nesta série histórica, o nível de energia de irradiância de $11,71 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ pode ser usado como referência de nível mínimo, em projetos de aplicações tecnológicas, no dimensionamento de coletores de energia solar e respectivos tanques de armazenamento da água aquecida em Sorocaba.

Análises com séries históricas mais longas poderão trazer melhores informações e confirmação sobre a exata relação entre os níveis de irradiância solar e as taxas de evaporação de água em Sorocaba.

5 Relationship between the solar radiation and water evaporation measured in Evaporation's Pan Class A and in Stevenson's Screen

Abstract: *The knowledge of the relation between the levels of distribution of energy on the land surface and other environmental factors is useful for characterizing the energetic potential of a region. In the analysis proposed on this paper, it was used a database of five years and four meteorological parameters, obtained from a Weather Station located at Sorocaba-SP. Data were submitted to statistical and comparative analyses. Major correlation values were observed between the solar irradiance and evaporation measured in a Stevenson's Screen (0.70) and between the hours of solar luminosity and evaporation of Evaporation Pan Class-A (-0.51). In February was observed the highest level of solar irradiance available and in July was observed the lowest level. Correlation analysis between the studied parameters was more sensible than the annual analysis, with all correlation values changing from 0.8 to 0.9. If we consider the remaining parameters dependents of direct solar irradiance on the surface, the $11.71 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{day}^{-1}$ is the minimum amount of energy that permits the exploration of the potential of energy for Sorocaba.*

Key-words: Solar energy, Irradiancy, Technological application.

6 Referências

CUNHA, G. R.; GOES, T. O. R.; FERREIRA, J. C. Estimativas da irradiância solar direta com base em dados de evaporação, para Sorocaba e adjacências, In: **Anais do 10º CONIC da FATEC-SP**, São Paulo-Capital, BT-25, v.1, Out. 2008.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Banco de Dados Climáticos do Brasil**. Disponível em: <http://www.bdclima.cnpm.embrapa.br>. Acesso em: junho de 2009.

FUNDAÇÃO SEADE. **Produto Interno Bruto – PIB Municipal**. Disponível em

www.seade.sp.gov.br. Acesso em junho de 2009.

GOMES, N.E.; ESCOBEDO, J.F.; OLIVEIRA, A. P.; SOARES, J. Estimativas da Radiação na Incidência Horária Diária e Mensal em função do Índice de Claridade (KT). In: **I Congresso Brasileiro de Energia Solar**, de 8 a 11 de abril de 2007, Fortaleza/CE.

GOES, T. O. R.; FERREIRA, J. C. Balanço hídrico e Disponibilidade de Água para Sorocaba e Região. In: **8º SCIT da Fatec-SP**, 2006.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Normais Climatológicas**. Disponível em www.inmet.gov.br. Acesso em junho de 2009.

IQBAL, M. **An introduction to solar radiation.** New York: Academic Press, 390p., 1983.

MARTINAZZO, C. A. **Modelos de estimativas de Radiação Solar para elaboração de Mapas Solarímetros.** Dissertação de mestrado - UFRGS, julho, 2004.

MILONE, G. **Estatística: Geral e Aplicada.** Editora Thomson, 483 p., 2004.

ODUM, E. P. & BARRETT, G. **Fundamentos de Ecologia.** Tradução da 5ª edição norte-americana. Cengage Learning. São Paulo, 612p., 2008.

OMETTO, J.C. **Estudos das relações entre: radiação solar global, radiação líquida e insolação.** Piracicaba/SP. Tese de doutorado – ESALQ –USP- 1968.

PRESCOTT, J. A. Evaporation from a water surface in relation to solar radiation. **Trans. R. Soc. Aust.** v.64, p.114-118, 1940.

SANTOS, R. A.; HERNANDEZ, F. B. T.; FIORAVANTI, C. D. LIMA R. C.; VALERIO FILHO, W. V. Estimativas de radiação Solar Global diária em Ilha Solteira/SP, **XXVII-CONBEA**, Goiânia/GO, 2003.

SILVA, A. M. Cobertura do solo do município de Sorocaba-SP e implicações na fragmentação dos remanescentes florestais. **Revista de Estudos Ambientais**, v. 7, n. 2, p. 38 – 46, 2005.

SOUZA, M.J.H., ALVES R. A. Distribuição espacial e temporal da irradiância solar direta diária, média de uma superfície horizontal para MG. **Eng. Agric.** Jaboticabal, v.17, n1, p.20-31, 1997.

SPENCER, J. W. A comparison of methods for estimating hourly solar radiation from global solar radiation. **Solar Energy**, Kidlington, v.29, p.19-32, 1982.

TUBELIS, A. Estimativa da radiação solar global diária em Botucatu/SP, a partir da insolação diária. **Botucatu Científica**. n.26, p.53-60, 1976.