

EVOLUÇÃO DIURNA E ANUAL DA RADIAÇÃO DIRETA NA INCIDÊNCIA

Eduardo Nardini Gomes¹, João Francisco Escobedo², Amauri Pereira de Oliveira³, Jacyra Soares³

Estação de Radiometria Solar do Departamento de Recursos Naturais - Ciências Ambientais, Faculdade de Ciências Agrônomicas
- UNESP, Caixa Postal 237, 18603-970, Botucatu, SP, e-mail: engomes@fca.unesp.br

RESUMO: A radiação solar direta na incidência é uma fração da radiação solar global e possui aplicações na agronomia, fisiologia vegetal e na engenharia térmica. No trabalho, é descrita a análise temporal da evolução diurna das médias horárias e da evolução anual das médias mensais, da radiação direta na incidência do período de 1996 a 2003, em Botucatu/SP/Brasil. A evolução diurna das médias horárias anuais gerou uma equação temporal, com elevado coeficiente de determinação $R^2 = 0,99867$, que permite estimar a radiação direta horária anual, com precisão e exatidão (MBE=1,0%, RMSE=3,7% e $d=0,9980$). A evolução anual da média mensal horária gerou uma equação temporal com coeficiente de determinação $R^2 = 0,75$, e a validação mostrou bom desempenho nos indicativos estatísticos, superestimando a medida em menos de 1% , espalhamento de 6,72% e índice de ajustamento de $d=0,9232$.

Palavras-chave: radiação solar, direta na incidência, evolução diurna, evolução anual.

INTRODUÇÃO

O conhecimento da radiação solar direta na incidência (0,285 a 4,0 μ m), por meio de séries temporais e de modelos de estimativa, é importante em muitas áreas científicas e tecnológicas. As séries temporais permitem conhecer a disponibilidade energética diurna e anual em função do tempo, sem necessidade de outros instrumentos de medida. No entanto, a obtenção das séries exige que medida da radiação direta na incidência seja realizada de rotina, por um tempo acima dos cinco anos.

No Brasil, o monitoramento das radiações nas Universidades é restrito à global, difusa, PAR e ondas longas (Cavalcanti, 1991; Oliveira et al., 2002a; Oliveira et al., 2002b; Soares, et al., 2004; Sousa et al., 2005; Tiba et al., 2005). Poucas são as informações sobre séries temporais e equações de estimativas para a radiação direta na incidência em função da radiação global. A causa principal dessa limitação dos grupos está no custo instrumental e de manutenção do pireliômetro e rastreador solar que é importado e caro. Com esse propósito, a Estação de Radiometria Solar de Botucatu/SP/Brasil, monitora simultaneamente as radiações direta na incidência e global desde o ano 1996. A base de dados existente das duas radiações ainda não é longa o bastante para geração de séries normais, no entanto é suficiente, em função do número de horas e dias, para geração de séries temporais mais curtas que indicam as tendências no dia e ano, bem como para obtenção das equações de estimativa horária, diária e mensal. Essas partições atendem um grande número de aplicações solares nas áreas física, biológica e tecnológica.

Assim objetivou-se no trabalho obter a evolução diurna das médias horárias do ano e dos meses, e a evolução anual das médias mensais dos dias, para analisar: os níveis de energia da radiação direta anual e mensal, a fração da radiação na superfície terrestre, a sazonalidade, e propor e validar as equações de estimativa temporal das evoluções diurna e anual.

MATERIAL E MÉTODOS

Clima e Instrumentação

A Estação de Radiometria Solar, mostrada na Figura 1, está inserida em ambiente rural na Faculdade de Ciências Agrônomicas (FCA) da Universidade Estadual Paulista (UNESP) de Botucatu (latitude 22,85°S, longitude 48,45°W e altitude 786m). O clima local é classificado como Cwa (critérios de KÖPPEN), temperado quente (mesotérmico), o verão é quente e úmido e o inverno é seco. O dia mais longo (solstício de verão) tem 13,4 horas em dezembro, e o mais curto (solstício de inverno) tem 10,6 horas em junho. Os meses de maior e menor número de horas de brilho solar ocorrem em agosto e fevereiro com totais médios de 161,56h e 115,28h respectivamente. A maior precipitação ocorre no mês de janeiro com total médio de 260,7mm e a mínima em agosto com 38,2mm. Os meses de fevereiro e julho são o mais quente e o mais frio do ano, respectivamente, com temperaturas médias de 23,2°C e 17,1°C, enquanto que fevereiro e agosto são os meses que apresentaram a maior e menor umidade relativa do ar, com

¹ Eng^o Agr^o, Dr. Departamento de Ciências Ambientais – FCA- UNESP.

² Físico, Professor Adjunto da UNESP.

³ Meteorologista, PH.D., Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Departamento de Ciências Atmosféricas, USP.

percentuais médios de 78,2% e 61,80% respectivamente. A Figura 2 mostra as séries normais da precipitação, número de horas de brilho solar, temperatura e umidade do posto meteorológico.



Figura 1. Pireliômetro Eppley NIP – Detector da radiação solar direta na incidência normal.

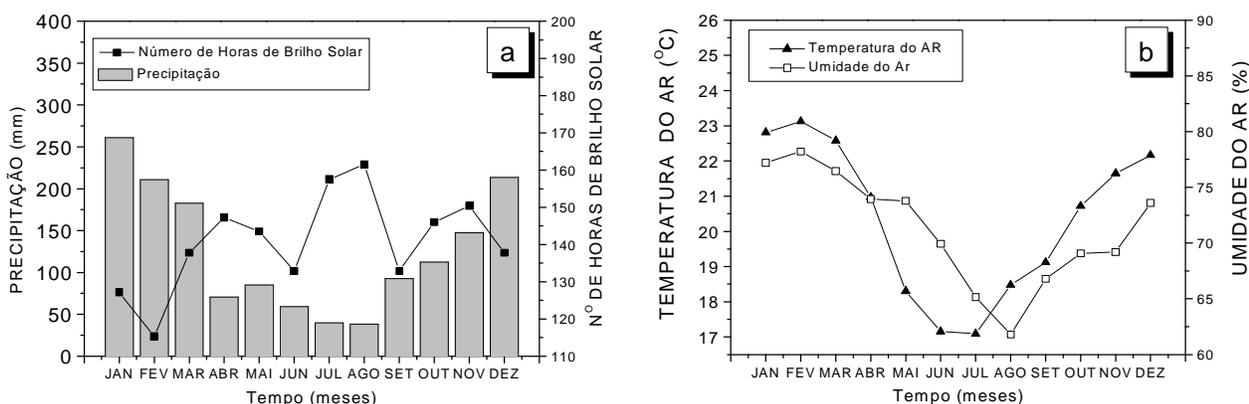


Figura 2. (a) Evolução anual da precipitação e número de horas de brilho solar acumulados médios mensais (35 anos); (b) Evolução anual da temperatura e umidade médias mensais de 35 anos.

A base de dados das radiações solares direta na incidência normal e global utilizada compreende os anos de 1996 a 2003. A irradiância global (I_g) é monitorada por um piranômetro Eppley PSP enquanto a direta na incidência normal (I_b) por um pireliômetro Eppley NIP, acoplado a um rastreador solar ST3 da Eppley. As características operacionais referentes a fator de calibração, intervalo espectral, tempo de resposta, linearidade, resposta ao cosseno e a temperatura dos detectores da radiação global e direta estão apresentadas na tabela abaixo:

Radiação	Direta	Global
Sensor – Marca	Pireliômetro - Eppley	Piranômetro - Eppley
Fator de Calibração	$7,59\mu V/Wm^{-2}$	$7,45\mu V/Wm^{-2}$
Range Espectral	295-2800nm	295-2800nm
Tempo de resposta (1/e)	1s	1s
Linearidade	$\pm 0,5\%$ (0 a $1400 W/m^2$)	$\pm 0,5\%$ (de 0 a $2800 W/m^2$)
Cosseno	--	$\pm 1\%$ ($0 < Z < 70^\circ$) $\pm 3\%$ ($70^\circ \leq Z < 80^\circ$)
Resposta à temperatura	$\pm 1\%$ de $-20^\circ C$ a $40^\circ C$	$\pm 1\%$ de $-20^\circ C$ a $40^\circ C$

Tabela 1. Características operacionais referentes a fator de calibração, intervalo espectral, tempo de resposta, linearidade, resposta ao cosseno e a temperatura dos detectores da radiação direta e global.

Na aquisição dos dados foi utilizado um Datalogger da Campbell CR23X operando na frequência de 1 Hz, armazenando médias instantâneas de 5 minutos (médias de 300 leituras instantâneas). Os dados armazenados diariamente no módulo de memória

SM192 da Campbell foram transferidos para um microcomputador utilizando-se uma interface SC532 e o software PC208w da Campbell. Numa segunda etapa, os dados foram processados por programas desenvolvidos especificamente para o cálculo das radiações horárias, diárias e mensais.

Modelo Temporal diário e anual.

As radiações, em MJ/m², foram calculadas a partir das integrações horária, diária e mensal das irradiancias global I_g , direta na incidência I_b , e no topo da atmosfera I_o , em W/m² (médias de 5 minutos).

Os modelos temporais diário e anual são baseados nas evoluções das médias horárias do ano, enquanto o modelo temporal anual, na evolução das médias mensais diárias. Para se determinar a evolução diurna da radiação direta calcularam-se as médias anuais das energias de cada hora, por:

$$(H_b^h)_y = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N H_b^h \quad (1)$$

onde $H_b^h = \int_{t_n}^{t_{n+1}} I_b(t) dt$, $t_n = n\Delta t$, $n = \text{inteiro}$, $(H_b^h)_y$ é a média anual (do ano y) da radiação direta H_b^h da hora h , e N é o número de observações horárias que a radiação direta apresentou no ano y .

A partir das energias médias, determinaram-se as médias horárias de 7 anos da radiação direta na incidência através da expressão:

$$\langle H_b^h \rangle = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (H_b^h)_{1995+n} \quad (2)$$

onde $\langle H_b^h \rangle$ é a média de 7 anos da radiação direta da hora (h), e N é o número de anos.

Na evolução anual da radiação direta calcularam-se as médias mensais das energias integradas de cada dia, por:

$$(H_b^m)_y = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N H_b^d \quad (3)$$

onde $H_b^d = \int_{t_{ns}}^{t_{ps}} I_b(t) dt$, t_{ns} é a hora do nascer do sol, t_{ps} é a hora do pôr-do-sol, $(H_b^m)_y$ é a média mensal da radiação direta diária H_b^d (do mês m no ano y) e N é o número de dias do mês m no ano y .

A partir das energias médias, determinaram-se as médias mensais de 7 anos da radiação direta na incidência normal (diária) através da expressão:

$$\langle H_b^m \rangle = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (H_b^d)_{1995+n} \quad (4)$$

onde $\langle H_b^m \rangle$ é a média mensal do mês m (de 7 anos) da radiação direta diária H_b^d , e N é o número de dias do mês m no ano n .

As radiações dos anos de 1996 a 2001 e 2003 foram utilizadas para geração das equações de estimativas, e o ano de 2002 para a validação. O critério de escolha para a geração dos modelos e da validação foi sorteio realizado antes de qualquer análise prévia dos dados. Posteriormente, foram eliminados os dias em que ocorreram paralisações devido a problemas elétricos de pelo menos um dos radiômetros, que mediam as radiações direta e global.

Os indicativos estatísticos *MBE* (Mean Bias Error), *RMSE* (Root Mean Square Error), e “d” de Willmott (1981) utilizados na avaliação da performance das equações de estimativa horária e diária da radiação global foram:

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

onde: P_i representa os valores estimados, O_i os valores medidos, N o número de observações, $|P'_i|$ o valor absoluto da diferença $P_i - \overline{O}_i$, onde \overline{O}_i representa a média de O_i , e $|O'_i|$ representa o valor absoluto da diferença $O_i - \overline{O}_i$.

A utilização conjunta dos indicativos estatísticos MBE , $RMSE$ e índice de ajustamento “d” é uma alternativa adequada para validação de modelos estatísticos, pois permite análise simultânea do desvio da média, identificando a ocorrência de sub ou superestimativa, espalhamento e ajustamento do modelo em relação às medidas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Evolução diurna da radiação direta média horária $\langle \overline{H}_b^h \rangle$ e da fração direta na incidência média horária $\langle \overline{K}_b^h \rangle = \langle \overline{H}_b^h / \overline{H}_{cs}^h \rangle$ na superfície da Terra.

A Figura 3 mostra a evolução diurna da radiação direta média horária $\langle \overline{H}_b^h \rangle$ e seus desvios $\langle \delta \overline{H}_b^h \rangle$ para cada intervalo de tempo em horas e da fração direta na incidência da radiação no topo na atmosfera média de 7 anos $\langle \overline{K}_b^h \rangle$. As evoluções diurnas de cada ano apresentam variações nos níveis de energia em função da variabilidade climática local, relacionada à nebulosidade, concentrações de vapor de água e aerossóis, durante o dia e ano. A integração diária das evoluções anuais de 1996 a 2001, e 2003 (da figura 3a) resulta em: $(16,64 \pm 10,6)$ MJ/m², $(16,78 \pm 10,30)$ MJ/m², $(15,85 \pm 9,83)$ MJ/m², $(17,27 \pm 10,62)$ MJ/m², $(16,04 \pm 10,24)$ MJ/m², $(16,55 \pm 10,43)$ MJ/m² e $(19,06 \pm 10,95)$ MJ/m², respectivamente, enquanto que a integração da radiação direta média horária de 7 anos resulta em: 16,89 MJ/m². Os anos de 1999 e 2003 são mais energéticos que a evolução média em 2,25% e 12,85%, respectivamente, enquanto que os anos de 1996, 1997, 1998, 2000 e 2001 são 1,48%, 0,65%, 6,16%, 5,03% e 2,01% menos energéticos.

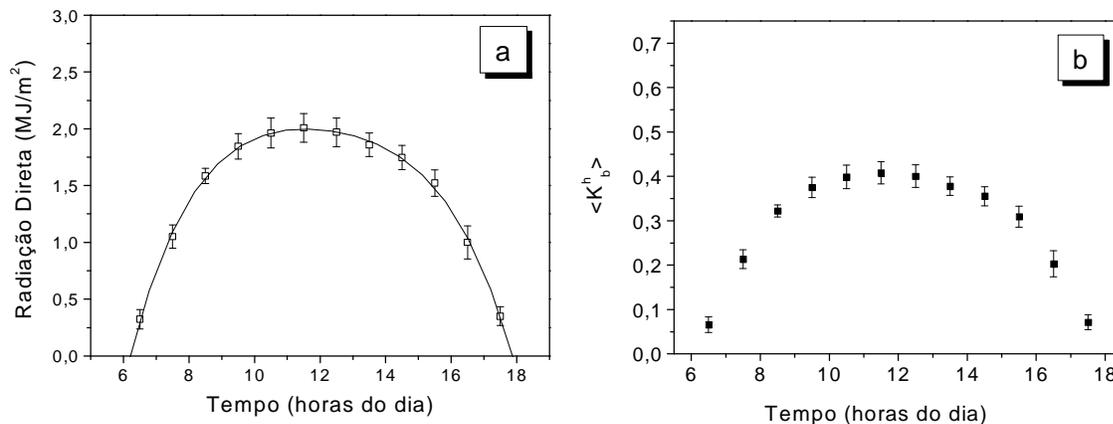


Figura 3. (a) Evolução diurna da radiação direta média horária de 7 anos com desvios e curva polinomial ajustada; (b) Evolução diária da fração $\langle \overline{K}_b^h \rangle$ horária de 7 anos.

A evolução diurna de $\langle \overline{H}_b^h \rangle$ apresenta uma quase simetria meridional do nascer do sol até o meio dia, e do meio dia até o pôr-do-sol. No período da tarde, as energias médias horárias são menores que as da manhã, e isto se deve à absorção da radiação direta devido ao aumento da nebulosidade durante o dia, a qual vai se acumulando no período da tarde. A evolução diária cresce até às 12h, atingindo o máximo de aproximadamente 2,0 MJ/m², decrescendo a seguir até às 17h30. A evolução da fração $\langle \overline{K}_b^h \rangle$ segue a mesma tendência da evolução da radiação $\langle \overline{H}_b^h \rangle$, mesmo porque a fração é proveniente da radiação por meio da divisão da radiação direta na incidência pela constante solar horária $\langle \overline{H}_{cs}^h \rangle$: 4,921 MJ/m² representada pela integração horária da irradiância no topo da atmosfera, de acordo com Iqbal, 1986). Os desvios percentuais de $\langle \overline{H}_b^h \rangle$ em função do tempo em horas são mais elevados no início e final do dia, sendo superiores a 23%, e decrescem gradualmente até o meio do dia, onde atingem cerca de 6%. Para o horário das 7h30 às 17h30, o desvio médio é da ordem de 8,8%, demonstrando que a variação da radiação direta média horária é relativamente estável entre os anos.

A função polinomial de quarto grau foi a que melhor se ajustou à evolução média anual da Figura 3 (a), sendo expressa por:

$$\langle H_b^h \rangle = -22,55913 + 7,48379t - 0,86835t^2 + 0,04582t^3 - 9,34882E - 4t^4 \quad (5)$$

onde t é o tempo em horas, e $\langle H_b^h \rangle$ é expresso em MJ/m². O elevado coeficiente de determinação, $R^2=0,9987$, mostra que a radiação direta horária média anual está bem correlacionada com o tempo em horas.

A Figura 4 mostra a validação, comparação entre a radiação direta média horária medida (base de dados de 2002) e estimada pela equação (5) em função do tempo em horas, na superfície terrestre.

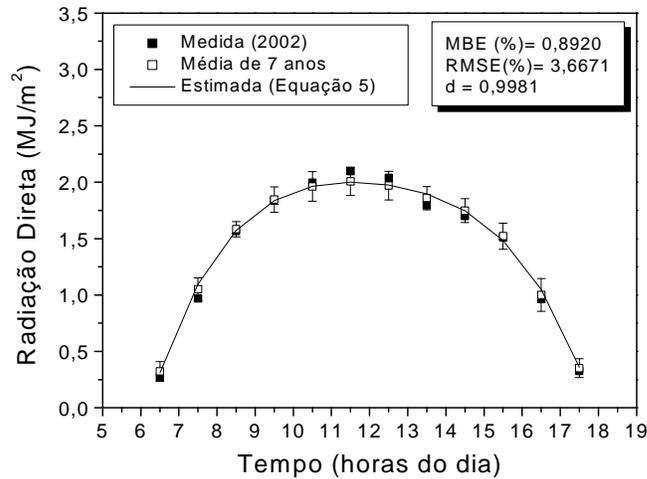


Figura 4. Evolução diurna da radiação direta média horária do ano de 2002 e estimada pela equação (5), e seus respectivos desvios.

O indicativo estatístico confirma o bom desempenho da equação (5), que no geral subestimou as medidas em menos de 1% (0,9%), com espalhamento na ordem de 3,7%, e um elevado índice de ajustamento, na ordem de 0,998.

A Figura 5 mostra o efeito da sazonalidade, através da comparação entre a evolução diurna da radiação direta horária média (de 7 anos) média mensal (7 anos) de junho $\langle \overline{H_b^h} \rangle_{JUN}$ e de dezembro $\langle \overline{H_b^h} \rangle_{DEZ}$ na superfície terrestre, em função do tempo em horas. Os meses de junho e dezembro foram escolhidos por representarem o início das estações do verão e do inverno, respectivamente.

O efeito da sazonalidade é notável na comparação entre as evoluções de junho e dezembro, pois são muito diferentes em relação à evolução média. Em alguns intervalos horários as evoluções mensais se invertem em relação à evolução média. No mês de dezembro, a radiação direta apresenta maior energia nos períodos entre 6h30 e 7h30 da manhã, e no final do dia, entre 16h30 e 18h30, devido à baixa concentração de aerossóis e vapor de água ocasionada pela elevada precipitação característica do mês. Nos horários das 8h30 às 16h30, a energia média mensal é menor que a energia média anual. Neste intervalo, os fatores determinantes da absorção são: a nebulosidade, precipitação e a alta concentração de vapor de água.

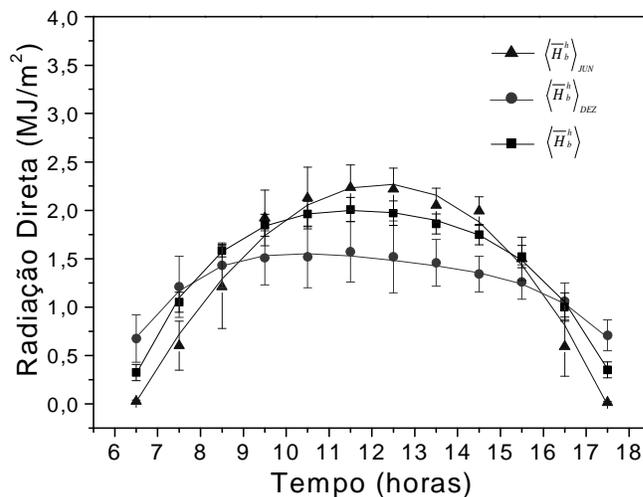


Figura 5. Evolução diurna da radiação direta horária média de junho e dezembro e da radiação direta horária média dos 7 anos.

Para o mês de junho, nos intervalos horários das 7h às 9h e das 15h às 18h a energia da radiação horária média mensal está abaixo da energia média anual, como esperado, porque a energia de junho é menor do ano. No entanto, das 9h às 15h, a energia média mensal superou a energia média anual, contrariando a expectativa, já que a radiação no topo da atmosfera de dezembro é aproximadamente o dobro da de junho. Uma diferença acentuada do número de horas de brilho solar entre junho e dezembro é considerável, como mostrado na figura 2, na qual o período de inverno é aproximadamente 2 vezes maior que do verão, bem como a precipitação de junho é de aproximadamente 0,25 vezes a de dezembro.

Em termos integrados das evoluções da Figura 5, a energia diurna média de junho é de $16,46 \text{ MJ/m}^2$, e de dezembro igual a $14,57 \text{ MJ/m}^2$, enquanto a evolução média anual é de $16,88 \text{ MJ/m}^2$. A diferença de energia entre a média horária anual e a média horária mensal de junho é de 2,5%, enquanto que em dezembro é de 13,7%. Os resultados mostram que a equação anual estima melhor a radiação direta no mês de junho do que dezembro. Em função dessa variação sazonal, verifica-se a importância do desenvolvimento das evoluções diurnas da radiação direta média mensal horária.

Evolução Anual das Radiações Médias Mensais

A evolução para cada ano apresentou uma variação singular, dependente das condições atmosféricas relacionadas à nebulosidade, precipitação de cada mês. Nos meses em que tais fatores foram pequenos, a transmissividade atmosférica da radiação direta foi elevada, e vice versa. A Figura 6 mostra a curva polinomial ajustada à evolução da radiação direta média mensal dos 7 anos, e a fração $\langle K_b^m \rangle$.

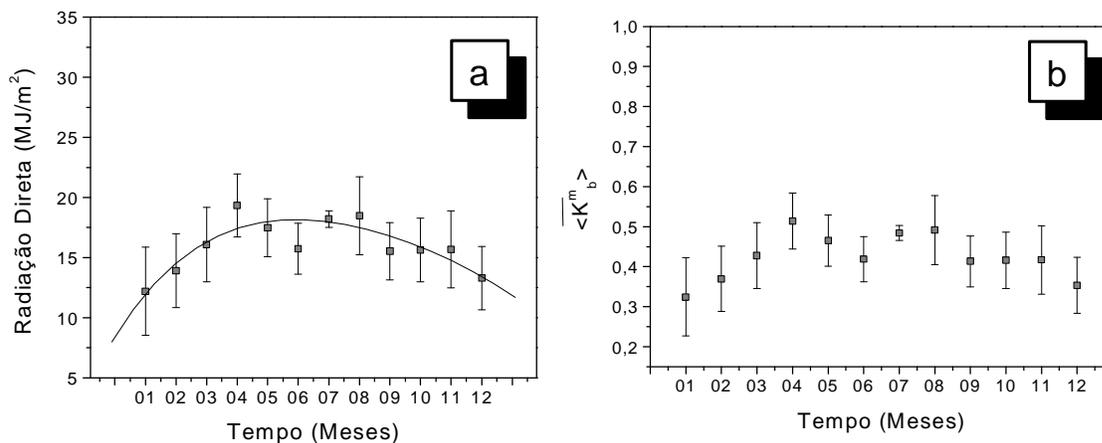


Figura 6. Evolução da radiação direta média mensal com a curva polinomial ajustada e da fração média mensal dos 7 anos.

A evolução da fração média mensal $\langle K_b^m \rangle$ seguiu também a mesma tendência da evolução anual da radiação $\langle H_b^m \rangle$ em diferente ordem de grandeza, já que representa uma fração da radiação direta média mensal. A fração média mensal é obtida dividindo-se a radiação média mensal (diária) pela constante solar média mensal diária ($37,59 \text{ MJ/m}^2$ por dia), e reflete a dependência da atmosfera quanto à concentração da nebulosidade, precipitação. A evolução mostra que a fração $\langle K_b^m \rangle$, inicia com 30,0% em janeiro, crescendo até abril quando atinge 62,0%. Em maio decresce para 43,0%, em junho cresce para 58,0%, decrescendo, a seguir, até setembro com 38,05% e oscilando sucessivamente, até dezembro com percentual de 40,0%.

A Figura 7(a) mostra a evolução anual média dos 7 anos com os desvios, em função do tempo e a evolução das médias mensais do número de horas de brilho solar. As duas evoluções estão bem relacionado na maioria dos meses, como fevereiro, março, maio, junho, julho, agosto, setembro, outubro e novembro, enquanto que nos meses de janeiro, abril e dezembro a correlação é regular, muito provavelmente devido às variações de aerossóis e vapor de água que são mais intensas nesses meses.

A Figura 7(b) mostra as evoluções da radiação direta média mensal diária e da precipitação acumulada média de 7 anos, em função do tempo em meses. A evolução anual da radiação direta mostra que os meses de abril, maio, julho e agosto, são os meses com maior energia, e os meses de janeiro, fevereiro e dezembro, os de menor disponibilidade energética. Os meses de março, junho, setembro, outubro e novembro encontram-se em um nível intermediário.

Uma análise da evolução da radiação direta e da precipitação acumulada média (em mm), confirma a dependência inversa das duas variáveis. Nos períodos chuvosos, constituídos dos meses de janeiro, fevereiro, março, e abril, a precipitação decresce de um nível de 250mm para 50mm, no sentido de que a radiação direta aumenta de $12,2 \text{ MJ/m}^2/\text{mês}$ para $19,4 \text{ MJ/m}^2/\text{mês}$; de setembro a dezembro, também no período chuvoso a precipitação tende a crescer de 103mm a 215mm, enquanto que a radiação direta

decrece de 15,5MJ/m²/mês a 13,3MJ/m²/mês. Entre abril e agosto, período de seca, o nível de precipitação foi inferior a 100mm, enquanto que a radiação situou-se por volta de 17MJ/m².

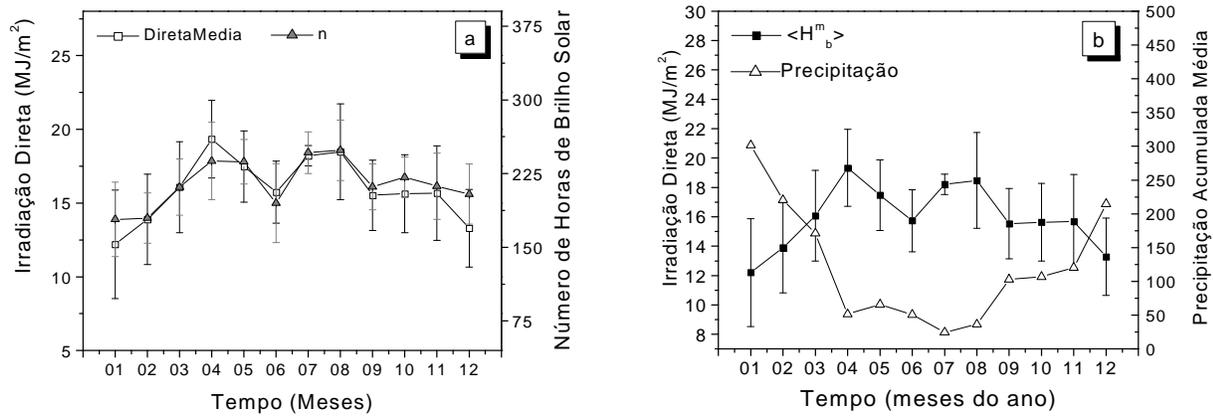


Figura 7. Evolução anual radiação direta média $\langle \bar{H}_b^m \rangle$ com desvios, médio de 7 anos: (a) número de horas de brilho solar (n) acumulada mensal. (b) precipitação acumulada mensal.

A equação temporal para a evolução anual é polinomial de quarta ordem, conforme abaixo representada:

$$\langle H_b^m \rangle = 8,40 + 4,1t - 0,58t^2 + 0,03t^3 - 0,0008t^4 \quad (6)$$

onde t representa o tempo em meses.

O coeficiente de determinação ($R^2 = 0,75$) expressa que a qualidade do ajuste é regular, tendo em vista que 40% das médias estão externas à curva ajustada. Se os desvios forem levados em consideração, apenas um ponto (mês de junho) não estaria sendo contemplado pela curva ajustada. Os desvios relativos da média são maiores nos meses de janeiro, fevereiro novembro e dezembro, com valores superiores a 20%. Nos meses de março, abril, maio, junho, agosto, setembro e outubro situaram-se entre 13 e 20%, e junho com 4%. O desvio relativo médio da evolução anual da radiação direta média mensal foi igual a 17,18%, e superior ao desvio relativo médio da evolução diária da radiação direta das médias horárias anual, igual a 7,33%.

A Figura 8 mostra a comparação da direta estimada pela equação (6) e a medida do ano de 2002 em função do tempo em meses.

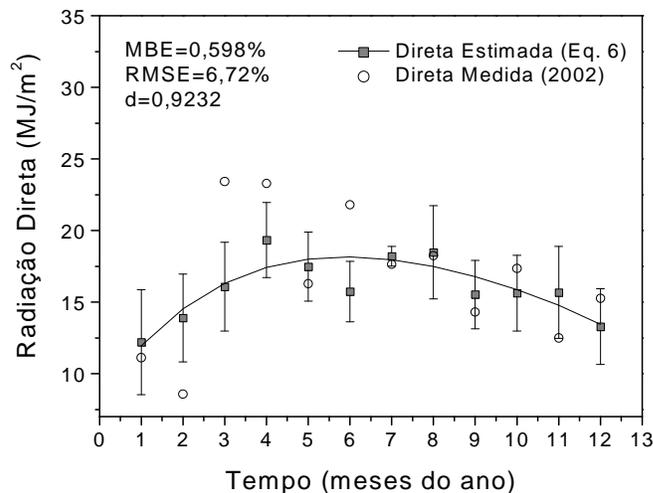


Figura 8. Evolução da radiação direta medida (média mensal dos 7 anos), estimada (2002) e a curva polinomial ajustada.

Nos meses de fevereiro, março, abril, e junho, as estimativas com os desvios não representam a medida em todos os meses, o modelo superestimou em fevereiro (em $5,95\text{MJ/m}^2$), e subestimou a medida em março ($7,12\text{MJ/m}^2$) abril ($-5,87\text{MJ/m}^2$) e junho ($3,64\text{MJ/m}^2$).

Nos demais meses, a medida está inserida dentro do intervalo de variação da estimativa. As causas que levaram à não-concordância entre medida e estimada nos 4 meses são devidas a precipitação e ao número de horas de brilho solar nos meses de fevereiro, março abril e junho, os quais variaram em relação à precipitação e número de horas de brilho solar médio dos 7 anos. A escolha do ano de 2002 penalizou a validação, tendo em vista que no mês de fevereiro aproveitou-se apenas 18 dias de medidas. Neste período, fortes chuvas, e fenômenos elétricos danificaram o sistema de rastreamento solar, de forma que parte das medidas não pôde ser aproveitada. A consequência da falta de 10 dias diminuiu consideravelmente a média, prejudicando a análise do desempenho da análise do modelo.

A validação da equação (6) segundo os indicativos estatísticos, mostrou ocorrer superestimativa da medida em menos A precipitação do ano de 2002 foi inferior à precipitação média nos meses de fevereiro, março, abril, e junho nos quais as estimativas não concordam com as medidas, o que leva a entender que quanto menor a precipitação, maior é a radiação direta na superfície terrestre, razão pela qual, os meses de março, abril e junho a medida excede a estimativa. No mês de fevereiro, apesar da precipitação ter sido inferior à precipitação média, a estimativa e a medida encontram-se muito próximas, indicando assim que a precipitação não é o responsável pelo baixo nível de radiação, a ponto de ocorrer superestimativa.

CONCLUSÕES

A evolução diurna da radiação direta na incidência média horária anual variou 24% entre as evoluções mais e a menos energéticas em relação à evolução média dos 7anos. A equação temporal ajustada à evolução diurna média horária anual, com elevado coeficiente de determinação, pode estimar a radiação direta horária com precisão e exatidão. A sazonalidade na estimativa foi constatada por meio da comparação dos meses de dezembro e junho, e mostrou uma tendência de ocorrer uma melhor estimativa no período de céu aberto (junho), que no de céu parcialmente nublado (dezembro). Nas estações de verão e primavera, onde ocorre maior nebulosidade e concentração de vapor de água, a radiação direta na incidência na superfície terrestre é menor que a média anual, enquanto que, nas estações do inverno e outono, onde ocorre baixa nebulosidade e vapor de água, a radiação direta é maior que a média anual. A evolução anual apresentou variações singulares, dependentes das condições atmosféricas relacionadas à nebulosidade e precipitação para cada ano. A evolução anual média dos 7 anos foi proporcional à evolução da nebulosidade e inversamente proporcional à evolução da precipitação. A equação temporal anual, ajustada por meio da evolução média mensal dos 7 anos, apresentou coeficiente de determinação (R^2) na ordem de 0,75, indicando correlação é regular estatisticamente. A validação da equação temporal anual mostrou bom desempenho na estimativa segundo os indicativos estatísticos.

REFERÊNCIAS

- Cavalcanti, E.S.C. (1991) Analysis of experimental solar radiation for Rio de Janeiro, Brazil. *Solar Energy* **47**, 231-235.
- Iqbal, M. (1983) An introduction to solar radiation, pp. 50-53. Academic Press, New York.
- Oliveira, A.P., Escobedo, J.F., Machado, A.J., Soares, J. (2002) Correlation models of diffuse-solar radiation applied to the city of São Paulo, Brazil. *Applied Energy* **71**, 59-73.
- Oliveira, A.P., Machado, A.J., Escobedo, J.F., Soares, J. (2002) Diurnal evolution of solar radiation at the surface in the city of São Paulo: seasonal variation and modeling. *Theoretical and Applied Climatology* **71**, 231-250.
- Soares, J., Oliveira, A.P., Boznar, M.Z., Mlakar, P., Escobedo, J.F., Machado, A.J. (2004) Modeling hourly diffuse solar-radiation in the city of São Paulo using a neural-network technique. *Applied Energy* **79**, 2, p. 201-214..
- Souza, J.L., Nicácio, R.M., Moura, M.A.L. (2005) Global solar radiation measurements in Maceió, Brazil. *Renewable Energy* **30**, 1203-1220.
- Tiba, C. Aguiar, R., Fraidenraich, N. (2005) Analysis of a new relationship between monthly global irradiation and sunshine hours from a database of Brazil. *Renewable Energy* **30**, 957-966.
- Willmott, C.J. (1981) On the validation of models. *Physical Geography* **2**, 184-94.

SUMMARY: This work describes the diurnal evolution of the hourly-averaged and the annual evolution of the monthly-averaged of the direct radiation in the incidence carried out from 1996 to 2003, in Botucatu/SP/Brazil. The diurnal evolution of the hourly values of the direct radiation provided a temporary equation, with high coefficient of determination $R^2 = 0.99867$, which allows to esteem with accuracy (MBE=1.0%, RMSE=3.7% and $d=0.9980$). Because of the seasonal dependence, equations to estimate diurnal evolution of the hourly monthly average values of the direct radiation were proposed, with high determination coefficients. The annual evolution of the daily monthly average values provided a temporal equation with $R^2 = 0.75$, and the validation showed good agreement in the statistical indicators, overestimating the measure in less than 1%, scattering in 6.72% with index of adjustment of $d=0.9232$.

Keywords: solar radiation, beam, direct, estimative models, measurements, and modelling.