

ESTUDO COMPARATIVO DA RADIAÇÃO SOLAR EM ÁREA URBANA E RURAL

Georgia Codato¹, Amauri P. Oliveira², Jacyra Soares³ João F. Escobedo⁴

RESUMO

Neste trabalho são comparadas as evoluções temporal dos valores diários e horários de radiação solar global e difusa observadas nas cidades de São Paulo e Botucatu. Observou-se que São Paulo recebe menos radiação global e mais difusa do que Botucatu durante o ano inteiro. Este comportamento é devido ao fato de São Paulo estar mais próximo do oceano Atlântico e estar sujeito a um maior transporte de umidade e aerossol marítimo com a penetração sistemática da brisa marítima. São Paulo apresenta também maiores índices de poluição atmosférica do que Botucatu, atenuando mais a radiação solar do que Botucatu. Durante os meses de inverno e na ausência de nuvens a atenuação da radiação global devido à poluição em Botucatu é similar a de São Paulo. Este resultado surpreendente indica que a queima de biomassa associada a lavoura de cana de açúcar tem um importante impacto no balanço de radiação da região de Botucatu.

ABSTRACT

This work compares the temporal evolution of hourly and daily values of global and diffuse components of solar radiation at the surface in the cities of São Paulo and Botucatu. This comparison indicated that São Paulo receives less global and more diffuse solar radiation than Botucatu during all months of the year. This behavior is due to the fact that São Paulo is closer to the Atlantic Ocean and receives more moisture and maritime aerosol brought up by the systematic penetration of sea breeze. São Paulo presents also larger pollution levels and as consequence attenuates the solar radiation more intensively than Botucatu. During the winter months and under clear sky conditions the solar radiation attenuation due to the pollution is similar to São Paulo. This rather surprisingly results indicated that the biomass burning due to the sugar-cane harvest has an important impact in the radiation budget in the region of Botucatu.

Palavras-chave: São Paulo, Botucatu, radiação solar global, radiação solar difusa, material particulado.

Grupo de Micrometeorologia do IAG - USP, Rua do Matão 1226, 05508-090, São Paulo, SP

¹ georgia@model.iag.usp.br

² apdolive@usp.br

³ jacyra@usp.br

Departamento de Ciências Ambientais – FCA - UNESP - Campus de Botucatu - Fazenda Experimental Lageado

⁴ escobedo@fca.unesp.br

INTRODUÇÃO

Medidas de radiação solar na superfície são indicadores importantes da ação dos fatores antropogênicos na mudança climática e aquecimento global. A radiação solar na superfície é afetada pela presença de nuvens e aerossóis, pelo vapor d'água e demais gases do efeito estufa. O objetivo deste trabalho é comparar a irradiância solar global e difusa na superfície em uma área urbana, representada pela cidade de São Paulo, com uma área rural, representada pela cidade de Botucatu. Será dada atenção especial ao impacto causado pelo material particulado no campo da radiação solar para estas cidades.

A cidade de São Paulo está localizada a cerca de 60 km de distância do oceano Atlântico, enquanto Botucatu está a 221 km. Estudos anteriores indicam que a evolução diurna da radiação solar global e difusa está correlacionada com eventos de poluição na cidade de São Paulo, principalmente com o material particulado (Oliveira *et al.*, 2002a; Oliveira *et al.*, 2002b). São Paulo e Botucatu estão localizadas aproximadamente a mesma latitude e altitude (respectivamente, 23°33'S, 742m e 22°51'S, 786m). É assumido aqui que a irradiância solar percorre o mesmo caminho nos dois lugares, assim, as diferenças no campo da irradiância solar na superfície podem estar associadas com a variação espacial da profundidade ótica do aerossol, nuvens e conteúdo de vapor de água na atmosfera.

MEDIDAS

Os dados utilizados para São Paulo foram obtidos na estação micrometeorológica do IAG localizada no campus da Universidade de São Paulo, na estação meteorológica no Parque Estadual das Fontes do Ipiranga (PEFI) e na estação Cerqueira César da CETESB (Agência Ambiental do Estado de São Paulo). Para Botucatu, utilizaram-se os dados do Departamento de Ciências Ambientais, no campus da Universidade do Estado de São Paulo. Infelizmente, não existe informação disponível sobre material particulado em Botucatu, então se utilizou a estação da CETESB mais próxima com dados disponíveis de material particulado, Jaú (CETESB 2005), localizada 63 km de Botucatu, para o período de 2004 (Tabela 1).

RESULTADOS

Seguindo a evolução diurna da irradiância global e difusa na superfície (I_G e I_{DF}) é possível identificar os dias quando o céu não está significativamente coberto por nuvens (Oliveira *et al.*, 2002a). Neste trabalho, os dias de céu claro foram estimados por inspeção visual da evolução diurna da irradiância global e difusa.

A máxima frequência de dias de céu claro ocorre durante o inverno e a mínima durante o verão. O maior número de dias de céu claro ocorre em Agosto, pois é o mês mais seco do ano nas duas cidades. Aproximadamente 2,9% do total de 2192 dias são dias de céu claro nas duas cidades, simultaneamente. Isto indica que a influencia do padrão sazonal de nuvens é similar, sendo a maior frequência de dias de céu claro, durante todos os meses do ano, em Botucatu, pois está mais distante do oceano Atlântico do que São Paulo..

IAG		PEFI		Botucatu		CETESB - (PM ₁₀)	
Variável	Período	Variável	Período	Variável	Período	Estação	Período
Irradiância solar global	1996-2001	Velocidade do vento	24.08.1999	Irradiância solar global	1996-2001	Cerqueira César	1996 – 2000
Irradiância solar difusa	1996-2001	Direção do vento	24.08.1999	Irradiância solar difusa	1996-2001	Jaú	Média diária - 2004
Temperatura do ar	1996-2001	Temperatura do ar	24.08.1999	Temperatura do ar	1997-2001		
Umidade relativa	1996-2001	Umidade relativa	24.08.1999	Umidade relativa	1997-2001		
				Velocidade do vento	24.08.1999		
				Direção do vento	24.08.1999		

TABELA 1: Sensores e período de observação dos dados usados neste trabalho.

Variação sazonal dos valores diários

A figura 1 mostra a diferença dos valores diários entre São Paulo e Botucatu. A evolução sazonal das diferenças entre media mensal dos valores diários da radiação global e difusa mostra que durante todos os meses do ano São Paulo recebe menos radiação solar global e mais radiação solar difusa que Botucatu.

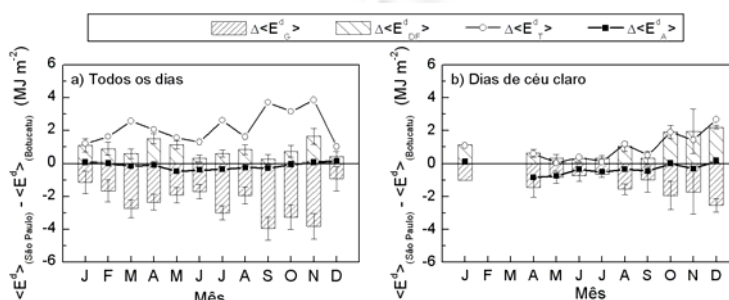


FIGURA 1: Evolução sazonal da média mensal dos valores diários da diferença da radiação global entre São Paulo e Botucatu considerando (a) todos os dias e (b) dias de céu claro. Período: 1996-2001. Barra vertical corresponde ao erro.

Três principais fatores podem contribuir para a diferença da radiação solar observada entre São Paulo e Botucatu: menos dias de céu claro; mais material particulado e maior conteúdo de umidade em São Paulo.

A evolução sazonal do contraste horizontal da atenuação atmosférica da radiação solar entre São Paulo e Botucatu são indicados na figura 1 (linha com circulo aberto) e estimada como:

$$\Delta \langle E_A^d \rangle = \left[\langle E_T^d \rangle - \langle E_G^d \rangle \right]_{\text{São Paulo}} - \left[\langle E_T^d \rangle - \langle E_G^d \rangle \right]_{\text{Botucatu}}. \text{ Considerando todos os dias, a atmosfera de São}$$

Paulo atenua mais radiação solar que Botucatu ($\Delta \langle E_A^d \rangle > 0$). Surpreendentemente, durante os dias de céu claro a atenuação em São Paulo é levemente maior que Botucatu (Fig. 1). Durante o inverno e dias de céu claro, a diferença na atenuação é da mesma ordem de grandeza da diferença da irradiância solar no topo da atmosfera (linha com quadrado na Fig. 1b), indicando que os maiores contrastes ocorrem durante o verão.

A figura 2 mostra que a concentração de material particulado (PM_{10}) em São Paulo é mais elevada do que em Botucatu durante a maior parte do ano. Quando todos os dias de setembro são considerados na estatística (Fig. 2a), a concentração de PM_{10} é $70 \mu\text{g m}^{-3}$ em Botucatu, cerca de 47% maior que São Paulo ($48 \mu\text{g m}^{-3}$). Isto indica que a atenuação atmosférica, em Botucatu, devido ao aerossol não é muito menor que em São Paulo como foi pensado inicialmente neste estudo. A figura 2b indica que durante os dias de céu claro as concentrações de PM_{10} são maiores que em todos os dias em São Paulo. Como a atenuação é basicamente a mesma (Fig. 1b) pode-se concluir que durante dias de céu claro, de abril a setembro, o conteúdo de aerossol em Botucatu seria, no mínimo, similar ao de São Paulo. Este resultado é surpreendente e indica que a queima de biomassa associada a cana-de-açúcar é importante para o balanço de radiação na área de Botucatu.

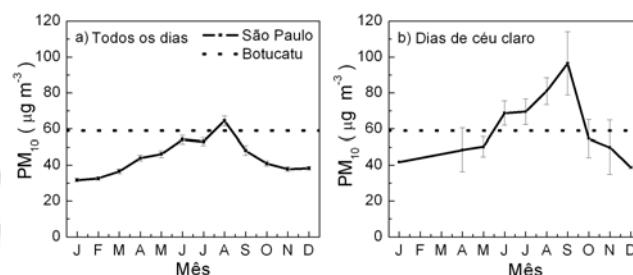


FIGURA 2: Evolução sazonal da média mensal dos valores diários do material particulado (a) em São Paulo (1996-2001) e Botucatu (2004) considerando todos os dias e (b) em São Paulo (1996-2001) considerando dias de céu claro. Barra vertical corresponde ao erro.

Variação sazonal da evolução diurna

A Figura 3 mostra a diferença, entre São Paulo e Botucatu, da média mensal horária da evolução diurna da irradiância solar global $\langle E_G^h \rangle$ e da irradiância solar difusa $\langle E_{DF}^h \rangle$ para agosto considerando os dias de céu claro e todos os dias.

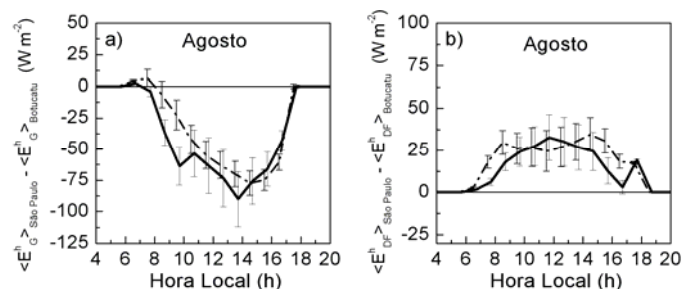


FIGURA 3: Evolução diurna da diferença da média mensal dos valores horários de radiação solar global e difusa, entre São Paulo e Botucatu considerando todos os dias (linha contínua) e dias de céu claro (linha tracejada).

Como esperado São Paulo recebe menos radiação solar global e mais radiação solar difusa do que Botucatu durante todas as horas do dia, ao longo de todo ano (Fig. 3). As diferenças se intensificam em torno das 1400 HL, para todos os dias. Em geral, o contraste horizontal da radiação solar global é menor somente quando os dias de céu claro são considerados, atingindo um máximo também em torno das 1400HL (Fig. 3). Por outro lado, considerando a barra de erro da figura 3b a diferença da intensidade da radiação solar difusa é aproximadamente a mesma pra dias de céu claro e todos os dias.

Evento de brisa marítima em São Paulo

A evolução diurna da diferença da irradiância solar em um dia de céu claro, entre São Paulo e Botucatu, em 24 de agosto de 1999, indica que em torno das 1400HL a máxima diferença no contraste da radiação difusa (Fig. 4) está associado a um máximo local da concentração de material particulado em São Paulo (Fig. 4b).

A temperatura e umidade relativa mostram o momento que a brisa marítima penetra em São Paulo (Fig. 4c,d). A diminuição da temperatura do ar e o aumento da umidade relativa seguida da penetração da brisa afetam primeiro a estação do PEFI e cerca de 1 hora depois o IAG. Teoricamente, o efeito causado pela penetração da brisa marítima em São Paulo não é sentido em Botucatu. Curiosamente, neste dia (24/08/1999) foi observado uma diminuição na temperatura seguida por um aumento da umidade relativa em Botucatu depois das 2000HL (Fig. 4c,d) mostrando que a propagação da brisa marítima pode penetrar no interior de São Paulo.

Resumidamente, as evoluções diurnas da radiação global e difusa, na superfície, estão fortemente correlacionadas com os eventos de entrada de brisa marítima em São Paulo, trazendo umidade que aumenta o espalhamento da radiação solar e reduz a intensidade da componente direta da radiação solar na superfície. Além da umidade, a brisa traz também aerossol marítimo para São Paulo (Castanho and Artaxo, 2001) que devido a seu caráter higroscópico pode favorecer a atenuação da radiação solar global.

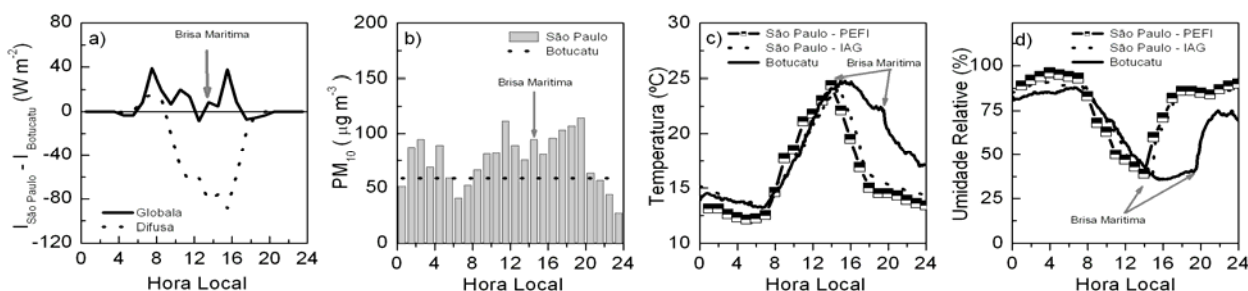


FIGURA 4: Evolução diurna dos valores horários da (a) diferença entre a irradiância solar em São Paulo e Botucatu; (b) material particulado em São Paulo e o valor médio de agosto para Botucatu (linha pontilhada); (c) temperatura do ar em São Paulo (PEFI e IAG) e Botucatu; (d) umidade relativa em São Paulo (PEFI e IAG) e Botucatu; (e) velocidade do vento em São Paulo (PEFI) e Botucatu e (f) direção do vento em São Paulo (PEFI) e Botucatu. Dia 24 de agosto de 1999.

CONCLUSÃO

São Paulo recebe menos radiação global e mais radiação difusa do que Botucatu durante o ano inteiro. Este comportamento é devido a (i) distância ao oceano Atlântico, (ii) penetração sistemática da brisa marítima em São Paulo (Oliveira *et al.*, 2003) e (iii) maior poluição atmosférica em São Paulo. A penetração da brisa em São Paulo traz umidade e aerossol marítimo aumentando o espalhamento da radiação solar e reduzindo a intensidade da componente direta da radiação solar na superfície.

Em geral, a concentração média diária de material particulado considerando todos os dias é menor que o valor médio diário considerando somente dias de céu claro em São Paulo. A concentração do material particulado em São Paulo é maior que o valor assumido como representativo de Botucatu para todos os dias. Baseado neste padrão, a atmosfera em São Paulo atenua mais radiação solar que Botucatu. Porém, a atenuação atmosférica da radiação solar sob condição de céu claro em Botucatu durante o inverno – queima de biomassa devido a colheita de cana-de-açúcar – é equivalente a da cidade de São Paulo, indicando que a contaminação devido a colheita da cana-de-açúcar no sudeste do Brasil tem um grande impacto no campo da radiação solar na superfície, atenuando consideravelmente a radiação solar na área de Botucatu durante o inverno.

AGRADECIMENTOS: Os autores agradecem o CNPq, Fapesp e CETESB.

REFERÊNCIAS

- Castanho A.D.A., Artaxo P. (2001) Wintertime and summertime São Paulo aerosol source apportionment study. *Atmospheric Environment* 35:4889–4992.
- CETESB (2005) Avaliação da qualidade do ar no município de Jaú –, ISSN 0103–4103, São Paulo, Brasil, 137pp. (<http://www.cetesb.sp.gov.br>).
- Oliveira A.P., Bornstein R.D., Soares J. (2003) Annual and diurnal wind patterns in the city of São Paulo. *Water, Air & Soil Pollution: FOCUS (WAFO)* 3:3–15.
- Oliveira A.P., Escobedo J.F., Machado A.J., Soares J. (2002a) Diurnal evolution of solar irradiance at the surface in the city of São Paulo: seasonal variation and modeling. *Theoretical and Applied Climatology* 71:231–249.
- Oliveira A.P., Soares J., Escobedo J.F., Machado A.J., Codato G., Galvani E. (2002b) Diurnal evolution of surface irradiance budget components in the cities of São Paulo and Botucatu. *Proceeding of the ENCIT 2002, Caxambú, MG, Brazil (CD-ROM)*.