

COMPARAÇÃO ENTRE A RADIAÇÃO SOLAR MEDIDA NA SUPERFÍCIE E ESTIMADA POR SATÉLITE NA REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO

Edson Roberto Marciotto – edson@model.iag.usp.br

Amauri Pereira de Oliveira – apdolive@usp.br

Universidade de São Paulo, IAG, Departamento de Ciências Atmosféricas

João Francisco Escobedo – escobedo@fca.unesp.br

Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, FCA, Departamento de Ciências Ambientais

Resumo. Neste trabalho é realizada uma comparação entre medidas de insolação obtidas na plataforma micrometeorológica do IAG (PM-IAG) e as estimativas de satélite com o objetivo de avaliar a representatividade das medidas pontuais da PM-IAG para região metropolitana de São Paulo (RMSP). É apresentada também uma descrição da metodologia empregada nas estimativas de insolação do satélite GOES-12. Neste trabalho, a comparação é realizada utilizando valores diários da radiação solar global observado no mês de junho de 2004. A boa concordância entre os valores observados em superfície na RMSP e os estimados por satélite indica que as observações na PM-IAG podem ser utilizadas para representar o campo de insolação na RMSP.

Palavras-chave: Radiação Solar, Sensoriamento Remoto, Medidas de radiação em Superfície

1. INTRODUÇÃO

A quantidade da radiação solar que atinge a superfície tem impacto decisivo no tempo e no clima. Os modelos de circulação global da atmosfera, de meso-escala e climáticos são, por esta razão, fortemente dependentes da estimativa da radiação solar descendente (Chou, 1992; Jin & Shepherd, 2005; Tavasova et al., 2006). O grande número de parâmetros envolvido bem como sua variabilidade, a complexidade dos modelos de transferência radiativa e o comportamento da atmosfera, são fatores que fazem com que a maior fonte de incerteza na estimativa da radiação descendente repouse sobre a modelagem dos processos radiativos. A variabilidade dos parâmetros atmosféricos e procedimentos experimentais sejam em terra ou no espaço também estão sujeitos a erros. Dessa forma o estudo da validade e da representatividade dos dados de radiação disponíveis é essencial.

Uma grande quantidade de dados de radiação tem sido coletada pelo grupo de micrometeorologia do IAG/USP. Recentemente Ferreira et al. (2007) fazem uso da radiação solar global e de onda longa emitida pela atmosfera para estudar o balanço de energia sobre a RMSP. A obtenção observacional dos fluxos de calor sensível e latente é fundamental para criar vínculos nos parâmetros utilizados em modelos numéricos (Marciotto & Oliveira, 2006). Por essa razão é importante verificar se dados pontuais são representativos para uma dada região.

Assim, o objetivo desse trabalho é comparar as estimativas de radiação solar global e difusa observadas na plataforma micrometeorológica com as estimativas do satélite GOES para investigar a representatividade espacial das observações realizadas em superfície.

2. SENSORIAMENTO REMOTO

Os satélites GOES-10 (lado oeste) e GOES-12 (lado leste) têm sido utilizados na estimativa da radiação global sobre a superfície com base num modelo físico simples, que pode incluir a presença de nuvem (Gautier et al. 1980; Gautier et al. 1983). Estes satélites estão equipados com um imageador e uma sonda. O imageador é um instrumento multicanal sensível à radiação solar e infravermelha provinda da atmosfera e da superfície da Terra. Ele utiliza uma disposição norte-sul de oito detectores de silício, produzindo assim oito linhas adjacentes na direção leste-oeste para cada varredura. O fluxo radiante (brilho) no topo da atmosfera é detectado pelos sensores do GOES, e a refletância e o albedo são obtidos das contagens por meio de uma equação de calibração. São consideradas somente nuvens maiores do que o campo visual do radiômetro.

No cálculo da radiação solar incidente para cada pixel é necessário decidir se seu valor de brilho corresponde uma região com ou sem nuvem. Regiões com nuvens têm maior brilho. Este fato torna possível o estabelecimento de um valor de brilho limite abaixo do qual o pixel em questão é considerado referente uma região sem nuvem. Comparando a energia que chega ao pixel pode-se decidir se a região é sem nuvem ou não, aplicando dessa forma o modelo adequado. O brilho limite para designar uma nuvem é obtido a partir da condição de céu claro mais uma faixa de confiança a fim de levar em conta um pequeno albedo da superfície, mudanças na umidade atmosférica ou ainda a presença de aerossol. O valor de brilho para céu claro é estimado do albedo da superfície, posição do Sol e efeitos atmosféricos correspondentes à hora em que os dados foram coletados.

O albedo da superfície é estimado de uma imagem de céu claro, que é por sua vez composta de uma série de imagens com valor mínimo de brilho e obtidas numa mesma hora do dia. Ao escolher um certo período do dia, evita-se o problema de normalizar os valores de brilho, mas gera um outro problema que é a variação do albedo com o ângulo solar. Este procedimento de obtenção de um brilho mínimo subtrai o brilho de alvos móveis (nuvens) do resultado composto de imagens. Usando estes valores de brilho de céu claro e o modelo correspondente a esta condição, calcula-se o albedo da superfície com resolução de 8×8 pixels.

3. VALIDAÇÃO DOS DADOS DO SATÉLITE GOES-2

Embora os dados utilizados para comparação neste estudo sejam os do satélite GOES-12 é interessante examinar a validação realizada para uma geração anterior: GOES-2. A razão disto é que as estimativas de insolação do GOES-2 foram validadas pelo mesmo procedimento que é utilizado na PM-IAG para a medição da radiação solar global. Os dados do GOES-2 foram comparados por Gautier et. al. (1980) com medidas em superfícies obtidas por piranômetros em três cidades do Canadá: Ottawa, Montreal e Toronto. Houve dois conjuntos de medidas em oito dias do período de abril (1978). O primeiro se caracterizou por dias desde completamente encobertos até dias relativamente claros. O segundo teve sete dias no período de julho/agosto (1979), ocorrendo desde dias com nuvens muito densas até dias sem nuvens. Houve um erro relativo de cerca de 30% em média para os dias 110 e 240 devido a situações de nuvens muito densas nesses dias. Entretanto um erro de 12% na média geral é encontrado (Tab.1).

Tabela 1. Insolação diária (em Langley) acumulada para três cidades do Canadá obtidas por satélite e em superfície ($1 \text{ ly/d} = 0,484 \text{ W m}^{-2}$).

Conjunto 1 Dia do ano	Ottawa		Montreal		Toronto	
	Satélite	Piran.	Satélite	Piran.	Satélite	Piran.
103	274	335	512	470	244	268
104	467	486	348	281	241	279
110	115	99	199	162	124	106
114	633	636	580	564	668	672
115	595	645	578	591	681	660
116	649	654	656	641	668	676
117	669	636	659	615	681	682
118	669	659	652	606	672	662
Conjunto 2 Dia do ano	Ottawa		Montreal		Toronto	
	Satélite	Piran.	Satélite	Piran.	Satélite	Piran.
194	547	532	666	648	371	392
198	594	643	637	544	736	729
199	712	699	726	696	702	600
200	190	299	132	147	506	471
201	636	489	558	475	630	573
202	252	255	374	357	291	263
240	99	52	92	68	307	242

4. RADIAÇÃO GLOBAL MEDIDA NA PM-IAG

4.1 Medidas em superfície: regional e local

A irradiância solar global e sua componente difusa são medidas continuamente por dois piranômetros localizados sobre a PM-IAG. O *Precision Spectral Pyranometer* modelo 2 (Fig.1a) mede a componente difusa e o *Black and White Pyranometer* modelo 8-48 (Fig.1b) mede a irradiância global. Esta escolha se deve ao fato de disponibilizar o instrumento mais preciso para a coleta da radiação difusa, a qual está sujeita a maiores flutuações. O modelo 2 apresenta maior precisão e sensibilidade devido a várias de suas características como linearidade, tempo de resposta e dependência com a temperatura do ar. A incerteza do modelo 2 é de cerca de 1%, enquanto que o modelo 8-48 pode ter uma incerteza de até 4%. Ambos dispositivos possuem sensibilidade espectral no intervalo de $0,29$ a $2,80 \mu\text{m}$.

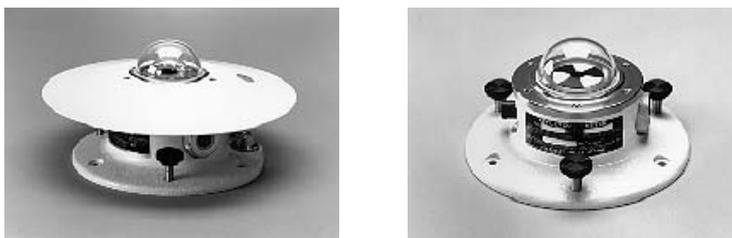


Figura 1. Piranômetros do IAG: (a) *Precision Spectral Pyranometer* modelo 2 (esquerda) e (b) *Black and White Pyranometer* modelo 8-48 (direita).

Nas comparações entre as medidas por satélite e em superfície Gautier et al. (1980) ressalta a dificuldade da localização exata dos piranômetros, que existe, mas é superada por um sistema de navegação preciso. Entretanto há também o problema de resolução espacial que para o satélite atual (GOES-12) é de cerca 20 km (0,2°), cada pixel cobrindo uma área de aproximadamente 200 km². A representatividade da radiação solar global e difusa é discutida por Oliveira et al. (2002) com base no estudo de Pereira et al. (1996). Seus resultados mostram que as medidas realizadas na PM-IAG (medida pontual) são representativas para a RMSP, mesmo incluindo variações sazonais. A Tab.2 resume os valores médios diários obtidos nas observações regional e pontual. Os valores de radiação global obtidos na PM-IAG apresentam valores sistematicamente menores (~16%) quando comparados com valores regionais e independe da estação do ano. Essa diferença sistemática não se explica apenas pelos erros de medida e devem ser devido ao efeito da poluição presente na RMSP.

Tabela 2. Comparação entre as medidas regionais de radiação global e difusa e as medidas da PM-IAG. Os valores estão em MJ m⁻². Verão corresponde aos meses de dezembro – fevereiro e inverno aos meses de junho – agosto.

	Regional Pereira et al.		Local (PM-IAG) Oliveira et al.		Dif. percentual	
	Global	Difusa	Global	Difusa	Global	Difusa
Verão	22,0	9,0	18,4	9,5	-16,4 %	5,6 %
Inverno	14,0	5,0	11,9	4,2	-15,0 %	-16,0 %

4.2 Comparação das medidas pontuais (PM-IAG) com dados do satélite GOES-12

Os dados obtidos por satélite representam médias diárias, ao passo que as medidas da PM fornecem médias horárias. Um esquema de integração e normalização é então utilizado para compará-las. Foram observados 30 dias no período de 01/06/2004 a 30/06/2004, os quais compreenderam entre dias de céu relativamente claro até dias com muita nebulosidade. Não há uma especificação direta de quais dias são claros ou nebulosos, sendo o julgamento feitos a partir dos valores esperados para um dia claro de inverno. Entretanto é fácil reconhecer um dia com nebulosidade seja ela estacionária ou variável. Dias completamente claros apresentam pouca dispersão dos pontos da radiação global. Se há nebulosidade durante apenas parte do dia, então nesse período os pontos referentes à radiação direta se apresentarão mais dispersos e serão acompanhados por algum aumento na radiação difusa. A Fig.2 mostra a insolação para alguns dias do ano selecionados 158, 164, 170 e 182, correspondentes a 6, 12, 18 e 30 de junho. Na Fig.3 estão os respectivos mapas de insolação obtidos do satélite GOES-12, cobrindo a América do Sul. Os dias 158 e 170 podem ser classificados como dias de céu claro. O dia 164 apresentou muita nebulosidade tal que a irradiância sobre a superfície foi extremamente baixa, não passando em média de 200 W m⁻². O dia 182 é particularmente interessante pois, entre 1100 e 1500 HL aproximadamente, acusa a presença de nebulosidade seja na maior dispersão dos dados de radiação global ou no aumento sistemático da radiação difusa.

Para comparar os dados obtidos por sensoriamento remoto (em MJ d⁻¹ m⁻²) com os medidos em superfície com o piranômetro (em W m⁻²) é preciso re-escalar os fluxos considerando o período em que foram medidos em superfície. Neste ponto a largura da base da curva influencia o valor do fluxo normalizado (fluxo integrado / período de integração). Quando é levada em conta toda a curva, as regiões extremas contribuem pouco para fluxo integrado, além do que as medidas nos períodos próximos ao nascer e pôr do Sol estão sujeitas a muitas flutuações. O intervalo em que as curvas são consideradas afetam, contudo, sensivelmente o fluxo normalizado. Tendo isso em vista, foi decidido truncar os extremos da curva para a radiação global, que foi a utilizada no cálculo dos fluxos. A curva da radiação difusa não foi alterada a fim de tê-la como referência do intervalo em que os dados se encontram para cada dia. Tendo em vista esse problema com a radiação nos períodos próximos ao nascer e pôr do Sol, o programa que coleta os dados na PM-IAG foi melhorado de tal modo que medidas antes do nascer e após o pôr do Sol são agora automaticamente descartadas.

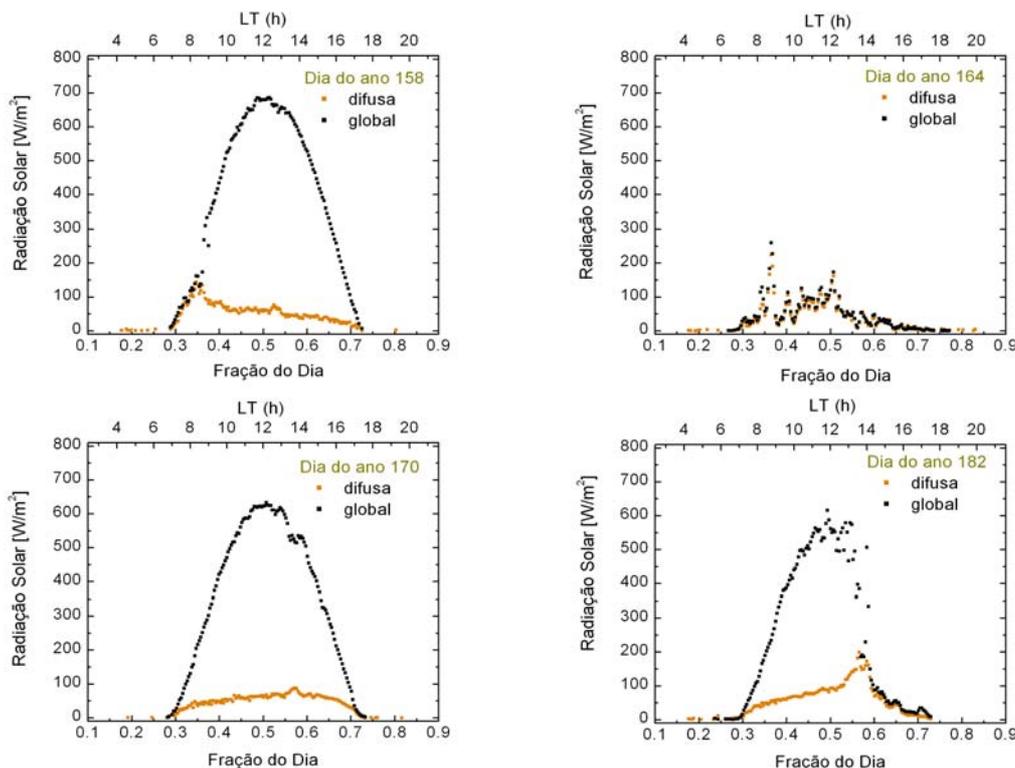


Figura 2. Insolação para alguns dias de junho de 2004, mostrando a sua variabilidade. O dia 164 em particular esteve sujeito a muita nebulosidade, enquanto dos dias 158 e 170 mantiveram-se praticamente claros. O dia 182 começa claro mas passa por período de nebulosidade após 1100 HL.

Considere-se as observações em superfície durante um intervalo de tempo $t_2 - t_1$. O piranômetro recebe uma potência por unidade de área F_{pir} em $W m^{-2}$, sendo o fluxo normalizado

$$F_{pir} (norm) = \frac{1}{t_2 - t_1} \sum_{t_1}^{t_2} \frac{1}{2} (F_{pir}^{(k)} + F_{pir}^{(k-1)}) (t^{(k)} - t^{(k-1)}), \quad (1)$$

em que $t \in [t_1/86400, t_2/86400]$ é uma medida de tempo adimensional denominada aqui fração do dia. O fluxo médio diário calculado para o satélite é

$$F_{sat} (norm) = \frac{F_{sat}}{t_2 - t_1} \times \frac{10^6}{86400}. \quad (2)$$

O erro percentual em relação às medidas obtidas com o piranômetro é $|F_{pir} - F_{sat}| / F_{pir}$, o qual não depende do intervalo de integração. Com base neste esquema foram calculadas as colunas 5, 6 e 7 da Tab.3. Os dias 177 e 182 apresentaram as maiores diferenças, 33 e 35% respectivamente, e 25% das observações apresentam erros superior a 20% (Fig.4), podendo ser considerados dias atípicos, embora problemas de manutenção, eletrônica e queda de tensão não sejam descartados. Aproximadamente 60% das medidas de fluxo obtidas por satélite apresentam erros menores ou iguais a 10% quando comparados com medidas em superfície. Dias com curvas de radiação (seja global ou difusa) muito irregulares tendem a apresentar os maiores erros. O dia 170, por exemplo, apresenta uma diferença percentual de apenas 1%, e este dia foi nitidamente claro como pode ser visto na Fig.2; a curva possui pouca dispersão. Este padrão foi observado para os demais dias selecionados para análise neste trabalho.

Este trabalho pode ser estendido para uma amostra muito maior de observações possibilitando assim uma análise estatística mais rigorosa. Mapas diários de insolação são fornecidos pelo departamento de ciências do solo da Universidade de Wiscosin em Madison (Diak et al. 2004). Têm sido coletadas tais informações e comparadas com médias diárias da PM-IAG. Análises mostram que a insolação observada via sensoriamento remoto utilizando o modelo Gautier et al. (1980) com as melhorias posteriores estão relacionadas de forma linear com as observações em superfície do grupo de Micrometeorologia do IAG, sendo a constante de proporcionalidade, dentro de erros, igual a 1 e desvio padrão menor que $2 MJ d^{-1} m^{-2}$ (Fig.4b). Esses resultados mostram que os dados de radiação obtidos na PM-IAG podem ser considerados como representativos da RMSF.

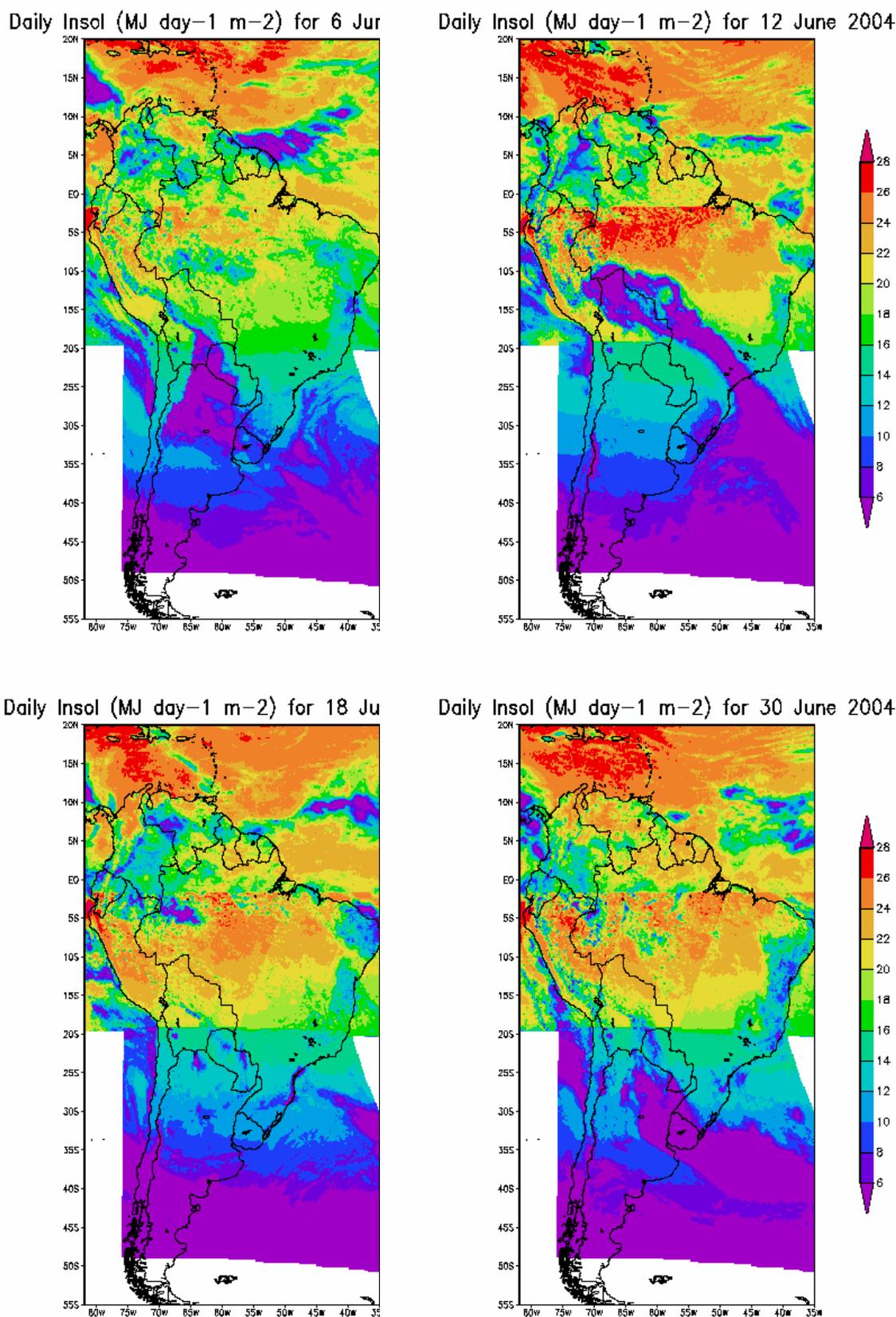


Figura 3. Mapas de insolação para os dias 6, 12, 18 e 30 de junho (dias do ano 158, 164, 170 e 182 respectivamente.) Os mapas bem como as matrizes numéricas podem ser obtidos no endereço eletrônico www.soils.wisc.edu/wimnext, um trabalho da NASA em conjunto com a universidade de Wisconsin-Madison (Diak et al., 1998).

Tabela 3. Insolação obtida na plataforma de micrometeorologia do IAG (USP) para os dias de 01/06/2004 a 30/06/2004. $F_{pir(int)}$ é a área sob a curva da radiação global na Fig.2; $F_{pir(norm)}$ é a área dividida pela fração do dia considerada (Coluna 2); $F_{sat(int)}$ está em MJ d⁻¹ m⁻² e os demais fluxos estão em W m⁻².

Dia do ano	$t_2 - t_1$	F_{pir} (int.)	F_{sat} (int.)	F_{pir} (norm.)	F_{sat} (norm.)	Erro %	Dia do ano	$t_2 - t_1$	F_{pir} (int.)	F_{sat} (int.)	F_{pir} (norm.)	F_{sat} (norm.)	Erro %
153	0,60	146,2	12,5	243,3	240,7	1	168	0,45	137,7	12,8	304,5	327,8	8
154	0,55	77,4	7,8	142,0	165,6	17	169	0,46	161,8	13,9	353,2	351,3	1
155	0,59	43,4	3,2	73,4	62,7	15	170	0,45	162,7	13,9	359,9	355,9	1
156	0,55	110,8	8,8	203,4	186,9	8	171	0,46	152,7	13,8	335,5	351,0	5
157	0,53	123,9	9,6	232,9	208,9	10	172	0,46	168,8	13,7	367,8	345,5	6
158	0,44	176,8	14,2	404,5	376,1	7	173	0,49	155,2	12,7	314,8	298,2	5
159	0,55	154,3	13,9	281,1	293,0	4	174	0,44	150,0	11,7	340,1	307,1	10
160	0,45	141,2	-	314,5	-	-	175	0,49	142,6	12,7	290,4	299,4	3
161	0,56	27,7	-	49,2	-	-	176	0,45	126,8	10,8	282,9	279,0	1
162	0,54	123,4	8,7	229,4	187,2	18	177	0,51	85,2	9,8	168,1	223,7	33
163	0,56	113,4	9,7	202,9	200,8	1	178	0,47	116,7	10,8	248,8	266,5	7
164	0,50	23,4	1,5	46,4	34,4	26	179	0,48	118,1	10,6	244,6	254,0	4
165	0,48	145,8	9,4	306,9	229,0	25	180	0,47	108,1	11,8	229,1	289,4	26
166	0,43	105,4	6,4	246,8	173,5	30	181	0,47	151,1	-	320,1	-	-
167	0,45	81,9	8,5	184,0	221,1	20	182	0,49	117,5	13,7	238,2	321,6	35

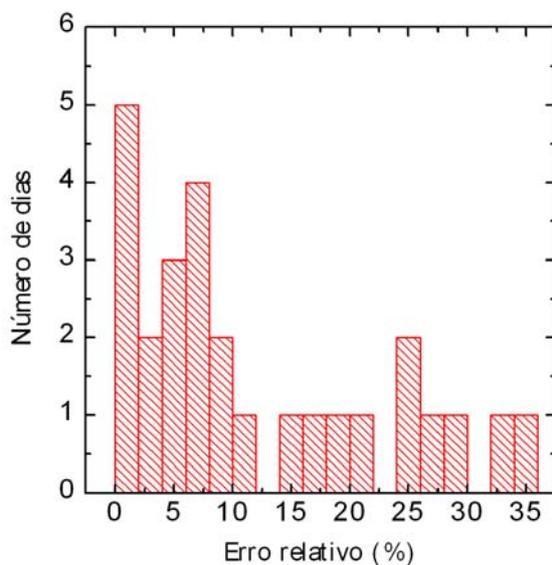


Figura 4. Distribuição de frequência do erro relativo. Os maiores erros apresentam baixa frequência. Em 60% dos fluxos diários o erro é inferior a 10%.

Na Fig.5a é mostrado que a relação entre as medidas na PM-IAG e as de satélite para 672 dias entre 2000 e 2004 são consistentes. Na Fig.5a não é feita distinção entre as estações do ano. Para verificar se há algum viés entre medidas de superfície e estimativas por satélite devido a sazonalidade, esse conjunto de dados foi separado em dois subconjuntos, um de 128 dias para o verão e outro de 170 dias para o inverno. A Fig.5b mostra que a relação entre as estimativas de satélite e as medidas em superfície praticamente não é afetada. O ajuste linear para os dias de verão resulta na relação $y = 1,00 x - 0,48$ e para os dias de inverno a relação é $y = 0,90 x + 1,15$ (não mostrados na Fig.5b). Esse resultado mostra que variações sazonais não desempenham papel significativo na representatividade dos dados da PM-IAG. O intervalo de confiança estimado para a amostra toda para o 95º percentil da distribuição de *t*-Student é de [0,948 ; 0,992] para o coeficiente angular e [0,103 ; 0,857] para o coeficiente linear.

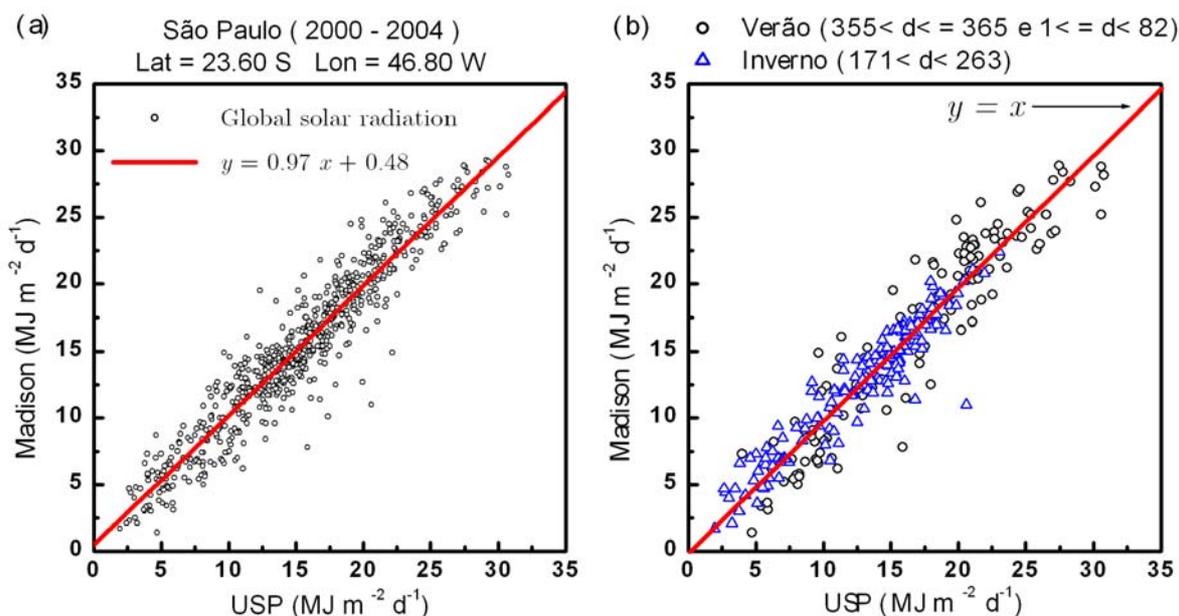


Figura 5. (a) Comparação dos dados obtidos por sensoriamento remoto para a localidade de Madison e os dados de superfície da plataforma micrometeorológica do IAG para 672 dias entre 2000 e 2004. Para este conjunto de dados, a correlação é bastante nítida e o coeficiente angular (0,97) mostra que as medidas pontuais em superfície obtidas na PM-IAG são representativas do campo de insolação estimado pelo GOES-12. (b) Similar ao gráfico anterior e para o mesmo período de anos, mas separando dias de verão e de inverno. Foram considerados dias (do ano) de verão o subconjunto $[356, 365] \cup [1, 81]$, totalizando 128 dias, e dias (do ano) de inverno o subconjunto $[172, 262]$, totalizando 170 dias.

4. CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho foi mostrar o quão bem medidas pontuais de radiação global e difusa realizadas em superfície na PM-IAG são representativas da radiação incidente em toda a RMSP. Para isso foram comparadas medidas realizadas com dois piranômetros na PM-IAG (pontual) com as estimativas obtidas por satélite (regional). A Tab.3 indica que os fluxos de radiação normalizados mostram que medidas pontuais da PM-IAG são de fato representativas da RMSP, para o mês considerado. Não obstante, esse resultado é estendido para outros períodos ano, e mostra que os dados observados na PM-IAG mantêm sua representatividade regional independente da estação do ano.

REFERÊNCIAS

- Chou M., 1992: A solar radiation model for use in climate studies, *J. Atmos. Sci.*, **49**, 762-772.
- Diak G.R., Gautier C., 1983: Improvements to a simple physical model for estimating insolation from GOES data. *J. Appl. Meteor.*, **22**, 505-508.
- Diak G.R., Anderson M.A., Bland W.L., Norman J.M., Mecikalski J.M., Aune R.M., 1998: Agricultural management decision aids driven by real-time satellite data, *Bull. Am. Meteor. Soc.*, **79**, 1345-1355.
- Diak G.R., Mecikalski J.R., Anderson M.C., Norman J.N., Kustas W.P., Torn R.D., DeWolf R.L., 2004: Estimating land surface energy budgets from space: review and current efforts at the University of Wisconsin-Madison and USDA-ARS, *Bull. Am. Meteor. Soc.*, **85**, 65-78.
- Ferreira M.J. Oliveira A.P. Soares J., Bárbaro E.W. Codato, G. Marciotto E.R., Silva M., 2007: Evolução diurna do balanço de radiação na superfície da cidade de São Paulo, Brasil. Anais do 8º Congresso iberoamericano de ingenieria mecanica, 2007, Cusco - Peru. 8º Congresso iberoamericano de ingenieria mecanica, 2007 (CDROM). [Disponível on-line em www.iag.usp.br/meteo/labmicro].
- Gautier C., Diak G., Masse S. A., 1980: Simple physical model to estimate incidente solar radiation at the surface from GOES satellite data. *J. Appl. Meteor.*, **18**, 1005-1012.
- Jin M., Shepherd J.M., 2005: Inclusion of urban landscape in a climate model: how can satellite data help?, *Bull. Am. Meteor. Soc.*, **86**, 681-689.
- Marciotto E.R., Oliveira A.P., 2006: Modeling the energy budget in the city of São Paulo flat terrain and homogeneous land use: 2006, Santa Catarina. Anais do XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia (CDROM). [Disponível on-line em www.iag.usp.br/meteo/labmicro].
- Oliveira A.P., Machado A.J., Escobedo J.F., Soares J. Diurnal evolution of solar radiation at the surface in the city of São Paulo: seasonal variation and modeling. *Theoret. Appl. Climatol.* 2002, **71**, 231-239.
- Pereira E.B., Abreu S.L., Stuhlmann R, Reiland M., Colle, 1996: Survey of incident solar radiation in Brazil by Meteosat satellite data, *Solar Energy*, **57**, 125-132.

Tarasova T.A., Fernandez J.P.R., Pisnichenko I.A., Marengo J.A., Ceballos J.C., Bottino M.J., 2006: Impact of new solar radiation parameterization in the Eta model on the simulation of summer climate over South America, *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **45**, 318-333.

COMPARISON BETWEEN SOLAR RADIATION MEASURED AT SURFACE AND ESTIMATED FROM SATELLITE IN THE METROPOLITAN REGION OF SÃO PAULO

Abstract. *In this paper a comparison between daily values of insolation measured at the IAG micrometeorological platform (PM-IAG) and estimated by satellite are carried out to assess how representative PM-IAG data is for the entire metropolitan region of São Paulo. The description of satellite GOES-12 technique and a brief overview of the validation process of the GOES-2 satellite data are presented. The comparison is based on daily values of global solar radiation for June 2004 and indicates that the PM-IAG data compares well with satellite estimates. Therefore, global and diffuse solar radiation measurements carried out in PM-IAG can be used to estimate insolation field in the metropolitan region of São Paulo.*