

# ARTIGOS DE DESENVOLVIMENTO TÉCNICO TECHNICAL DEVELOPMENT ARTICLES

## MEDIDAS DE RADIAÇÃO SOLAR NA CIDADE DE SÃO PAULO: CALIBRAÇÃO DE PIRANÔMETROS E APLICAÇÕES METEOROLÓGICAS

Amauri P. de Oliveira<sup>1</sup>, João F. Escobedo<sup>2</sup>, Artemio Plana-Fattori<sup>3</sup>, Jacyra Soares<sup>3</sup> & Paulo M. dos Santos<sup>3</sup>

O projeto "Estação de Radiometria Solar" tem como objetivo desenvolver radiômetros que possam funcionar, com grande precisão, por um longo período de tempo. Para tanto, os protótipos de piranômetro, desenvolvidos pelo Grupo de Radiometria Solar da UNESP (Universidade do Estadual Paulista), estão sendo avaliados através do acompanhamento da variação temporal de suas constantes de calibração. Dois desses protótipos foram instalados no edifício do IAG-USP (Instituto Astronômico e Geofísico da Universidade de São Paulo), na Cidade Universitária em São Paulo e estão desde março de 1994 medindo radiação solar global e difusa com dois piranômetros de referência calibrados. Dois métodos foram usados para estimar a constante de calibração dos protótipos: método do quociente (recomendado pela Organização Meteorológica Mundial, OMM) e método da regressão. As constantes de calibração dos protótipos obtidas pelos dois métodos não apresentaram discrepâncias significativas. Uma análise detalhada da evolução temporal das constantes de calibração dos protótipos indicou a presença de um significativo ciclo diurno, possivelmente associado aos efeitos cosseno e de temperatura. Uma aferição dos piranômetros de referência (PSP2 e PBW) feita, após 11 meses de uso contínuo, com um piranômetro padrão (PSP1) indicou uma redução de 5 % na constante de calibração do piranômetro de referência PSP2 (associada a um possível envelhecimento do sensor) e um aumento entre 4 e 7% na constante de calibração do piranômetro de referência PBW (associado às diferenças na disposição dos elementos sensíveis dos instrumentos ou mesmo a um possível erro de calibração de fábrica). As medidas efetuadas com os piranômetros de referência permitiram detectar uma diminuição da transmitância atmosférica de 18 % associada ao aumento da poluição do ar na cidade de São Paulo entre 26 e 30 de junho de 1994 e uma caracterização do eclipse solar parcial ocorrido em 3 de novembro de 1994. Durante o eclipse foram observadas reduções da ordem de 85% na irradiância solar global e de 95% na irradiância solar difusa. Dados de vento e de temperatura indicaram que apesar desse eclipse ser parcial (85%) o seu impacto sobre a camada limite planetária foi similar ao dos eclipses mais intensos.

**Palavras-chave:** Radiação solar; Piranômetros; São Paulo; Poluição do ar; Eclipse solar.

**MEASUREMENTS OF SOLAR RADIATION IN THE CITY OF SÃO PAULO: CALIBRATION OF PYRANOMETERS AND METEOROLOGICAL APPLICATIONS** - *The main goal of the project "Solar Radiation Station" is to develop radiometers that can be operated with high precision for a long period of time. The pyranometer prototypes, built by the Group of Solar Radiometry, UNESP (Universidade do Estadual Paulista), Botucatu, have been evaluated by following the time evolution of their calibration constants. Two of these prototypes were set at the top of the building of the IAG-USP (Instituto Astronômico e Geofísico da Universidade de São Paulo), in the City of São Paulo, and are measuring solar radiation simultaneously with two calibrated reference pyranometers, since march of 1994. Two methods were used to evaluate the calibration constants of the prototypes: quotient method (recommended by World Meteorological Organization, WMO) and regression method. The calibration constants obtained from both methods did not show any significant discrepancy. A detailed analysis of the time evolution of the calibration constant for the prototypes indicated a diurnal variation that may be due to temperature and cosine effects. It was carried out a calibration of the pyranometers used as reference (PSP2 and PBW) after 11 months of continuous use, with a standard pyranometer (PSP1). The results indicated a 5 % reduction in the calibration constant for the reference pyranometer PSP2 (associated to a probable aging effect) and an increasing between 4 and 7 % in the calibration constant of the reference pyranometer PBW (associated to the differences in the design of its sensitive element compared to PSP1 or even associated to a factory calibration problem). Global and diffuse solar radiation measurements carried out between June 26 and 30, 1994, allow to identify a decrease of 18% in the atmospheric transmittance associated with pollution in the City of São Paulo. Reductions of 85% for the global solar radiation and 95% for the diffuse solar radiation were observed during the partial solar eclipse on November 3, 1994. The available surface wind and temperature data indicated similar effects in the planetary boundary layer when compared to other more intense eclipse events.*

**Key words:** Solar radiation; Pyranometer; São Paulo; Air pollution; Solar eclipse.

<sup>1</sup>Departamento de Ciências Atmosféricas, Instituto Astronômico e Geofísico, USP Rua do Matão, 1226, - 05508.900, São Paulo, SP.

<sup>2</sup>Departamento de Física e Biofísica, Instituto de Bio-ciências, UNESP - Campus Rubião Júnior - 18610, Botucatu, SP

<sup>3</sup>Departamento de Ciências Atmosféricas, Instituto Astronômico e Geofísico, USP Rua do Matão, 1226, - 05508.900, São Paulo, SP.

## INTRODUÇÃO

O conhecimento das componentes do balanço de radiação solar (global, difusa, direta e refletida) com grande resolução espacial e temporal é uma exigência cada vez maior nas áreas de: (a) climatologia; (b) agrometeorologia, especialmente para o conhecimento da energia disponível para evapotranspiração e para aproveitamento fotossintético; (c) sensoriamento remoto, nos testes de algoritmos para estimativa destas mesmas componentes via satélites artificiais; (d) meteorologia ambiental, na avaliação da turbidez atmosférica e das reações fotoquímicas; (e) engenharia, nos estudos de potencial energético de origem solar.

As componentes do balanço de radiação solar são usualmente avaliadas empregando-se piranômetros, instrumentos capazes de medir a radiação solar proveniente de um hemisfério, de forma integrada sobre o intervalo de comprimento de onda entre 0,3 e 3  $\mu\text{m}$ .

Nos estudos envolvendo medidas de radiação solar com grande resolução espacial, em geral, são utilizadas redes de piranômetros com alta precisão. Por exemplo, em um estudo do impacto da poluição atmosférica sobre a radiação solar, Peterson et al. (1978) utilizando uma rede de seis estações piranométricas, cobrindo um área de 1000  $\text{km}^2$ , observaram variações espaciais médias de 6-8% da radiação solar global devido ao efeito da poluição. Para detectar variações espaciais desta magnitude torna-se necessário que os piranômetros tenham um precisão da ordem de 1%.

Por outro lado, em estudos que envolvam grande resolução temporal, são utilizados piranômetros que apresentem um tempo de resposta pequeno, como por exemplo da ordem de 1 segundo. Além disso, radiômetros empregados em estudos climatológicos terão que operar de forma contínua por um longo período de tempo, fazendo com que a estabilidade e a durabilidade sejam requisitos necessários desses instrumentos. Por fim, a operação destes radiômetros também requer que os erros sistemáticos devidos à temperatura, posição do sol etc., sejam inferiores à precisão requerida.

O projeto "Estação de Radiometria Solar", financiado pela FAPESP e FUNDUNESP, tem como objetivo o desenvolvimento de radiômetros que sejam capazes de atender às necessidades listadas acima. Na primeira fase deste projeto, o Grupo de Radiometria Solar do Departamento de Física e Biofísica da UNESP de Botucatu desenvolveu um protótipo de radiômetro usando tecnologia de termopilhas de filmes finos (Escobedo et al., 1994a, 1994b). A segunda

fase deste projeto está sendo realizada em parceria com o grupo de Micrometeorologia do Departamento de Ciências Atmosféricas do IAG-USP de São Paulo, e consiste em testar a estabilidade e durabilidade deste protótipo.

Para tanto, foram instaladas desde de março de 1994, duas plataformas radiométricas para medir as componentes global e difusa simultaneamente nas cidades de Botucatu e São Paulo. Estas observações serão utilizadas para determinar a estabilidade através do acompanhamento da variação temporal da constante de calibração do protótipo.

Neste artigo são apresentados dois métodos de cálculo da constante de calibração, o método da média do quociente e o método da regressão linear. Estes métodos foram aplicados para cinco piranômetros, sendo um padrão, dois de referência e dois protótipos. Os dados utilizados nestes cálculos foram obtidos a partir das observações de radiação solar realizadas em março de 1992 em Iperó, e em junho de 1994 e janeiro de 1995 em São Paulo. Além disso, são apresentados dois exemplos de aplicações meteorológicas obtidos com o banco de dados de radiação solar que está sendo gerado nesta fase do projeto em São Paulo. O primeiro refere-se a um evento de aumento da radiação difusa provocado pelo aumento da poluição. No segundo é mostrado o impacto do eclipse solar do dia 3 de novembro de 1994 sobre as componentes da radiação solar e outros parâmetros meteorológicos observados em São Paulo e Iperó.

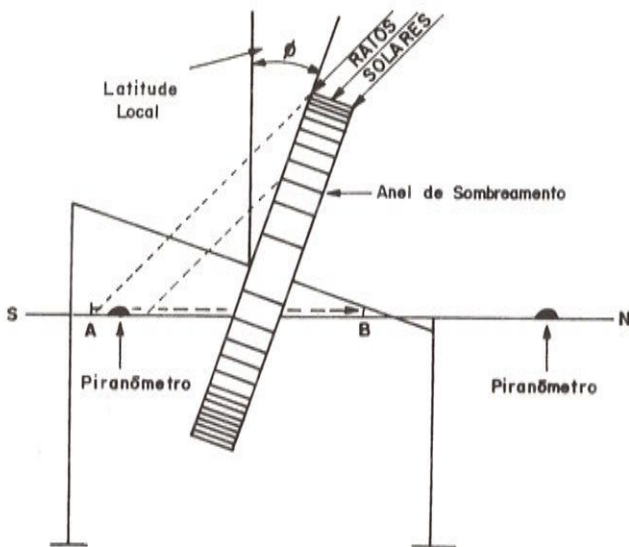
## INSTRUMENTAL

O instrumental utilizado neste trabalho consiste de uma plataforma radiométrica, instalada sobre o edifício do IAG-USP, localizado no campus da Cidade Universitária (23°33'35''S, 46°43'55''W), na cidade de São Paulo. Esta plataforma, em funcionamento desde março de 1994, consiste de um par de bancadas metálicas alinhadas no eixo geográfico Norte-Sul. Cada bancada metálica é composta de dois piranômetros, um inteiramente exposto de forma a medir irradiância global e outro solidário a um anel de sombreamento de forma a medir irradiância difusa.

Dois protótipos, denominados P1 e P2 foram instalados em uma bancada, com P1 medindo radiação global e P2 radiação difusa. Na outra, foram instalados dois piranômetros de referência, denominados PBW e PSP2, com PBW medindo a radiação global e PSP2 a radiação difusa.

Os anéis de sombreamento são constituídos de uma faixa metálica circular, fixa em relação à bancada, com diâme-

tro de 81 cm e largura de 10 cm, com eixo paralelo à direção Norte-Sul. A variação da sombra do anel com o ciclo anual da declinação solar é levada em conta deslocando-se periodicamente sobre a linha Norte-Sul os piranômetros alocados à medição de radiação difusa (Fig. 1).

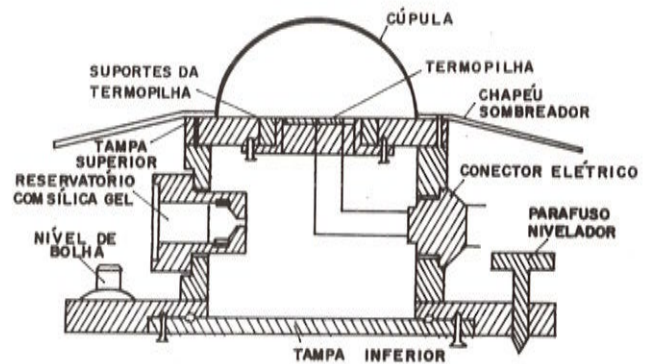


**Figura 1** - Vista lateral da bancada de radiação instalada sobre o edifício do IAG-USP no campus da Cidade Universitária ( $23^{\circ}33'35''S$ ,  $46^{\circ}43'55''W$ ), cidade de São Paulo, a 744 m acima do nível médio do mar.

*Figure 1* - Lateral view of the radiation platform set up at the top of the IAG-USP building at the "Cidade Universitária" campus ( $23^{\circ}33'35''S$ ,  $46^{\circ}43'55''W$ ), located in the city of São Paulo, at 744 m above the mean sea level.

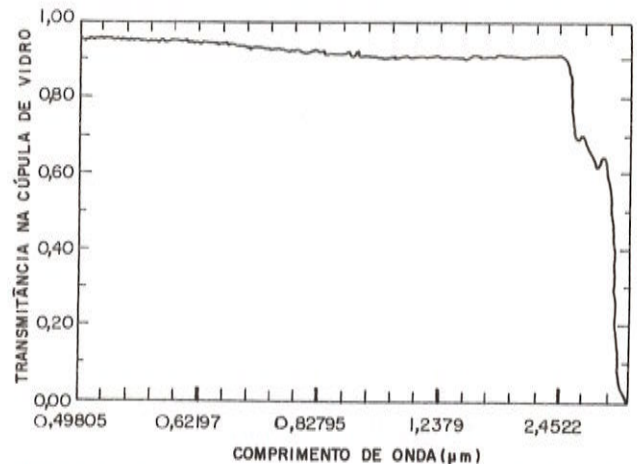
Os protótipos foram construídos sobre uma base de aço inoxidável, contendo: termopilha, cúpula, nível de bolha, reservatório de sílica-gel, conector elétrico, parafusos niveladores e chapéu (ou saia) de sombreamento (Fig. 2). As cúpulas de vidro (diâmetro de 60 mm) foram obtidas a partir do corte de lâmpadas incandescentes comerciais de boa qualidade óptica. Testes espectrofotométricos evidenciaram que tais cúpulas apresentam transmitância entre 90% e 95% na região espectral 0,50-2,50  $\mu\text{m}$  (Fig. 3). Deve ser ressaltado que o intervalo de comprimento de onda indicado na Fig. 3 omite duas faixas importantes do espectro solar: 0,3-0,5  $\mu\text{m}$  e 2,5-3  $\mu\text{m}$ . Os limites apresentados na Fig. 3 foram estabelecidos pela metodologia de operação do espectrofotômetro. Apesar disso, pode-se verificar que o comportamento assintótico da curva nos dois extremos indica que a transmitância tende a ser maior do que 0,95% no intervalo 0,3-

0,5  $\mu\text{m}$  e aproximadamente zero no intervalo 2,5-3,0  $\mu\text{m}$ . Assim, pode-se afirmar que a cúpula apresenta o comportamento óptico desejado no intervalo de interesse para a radiação solar.



**Figura 2** - Vista lateral dos protótipos desenvolvidos pelo Grupo de Radiometria Solar do Departamento de Física e Biofísica da UNESP de Botucatu (Escobedo et al., 1994a, 1994b).

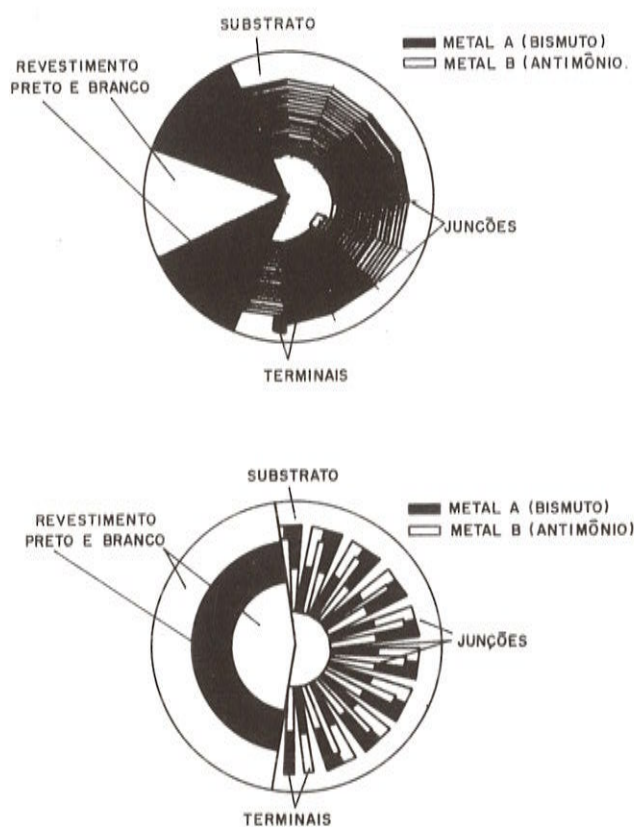
*Figure 2* - Lateral view of the prototypes developed by the Group of Solar Radiometry, Department of Physics and Biophysics, UNESP, Botucatu, (Escobedo et al., 1994a, 1994b).



**Figura 3** - Espectro de transmitância da cúpula de vidro empregada nos protótipos. A ordenada corresponde à transmitância espectral (%) e a abscissa corresponde ao comprimento de onda ( $\mu\text{m}$ ). A escala da abscissa é igualmente espaçada em número de onda no intervalo entre 20078 a 4078  $\text{cm}^{-1}$ , com espaçamento igual a 4000  $\text{cm}^{-1}$ .

*Figure 3* - Spectral Transmittance obtained from the glass hemisphere used in the prototypes P1 and P2. The ordinate corresponds to the spectral transmittance (%) and the abscissa corresponds to wavelength ( $\mu\text{m}$ ). The abscissa is set up in an equally wavenumber intervals between 20078 and 4078  $\text{cm}^{-1}$ , with grid of 4000  $\text{cm}^{-1}$ .

O protótipo P1 tem como sensor uma termopilha tipo estrela (diâmetro de 25 mm) com 36 termopares de bismuto-antimônio (espessura de 3500 Angstroms) depositados sobre um substrato de acrílico (espessura de 1 mm). O protótipo P2 tem como sensor uma termopilha tipo disco-concêntrico (diâmetro de 32 mm) com 36 termopares de bismuto-antimônio (espessura de 3500 Angstroms) também depositada sobre um substrato de acrílico (espessura de 1 mm). Ambos os sensores são esquematizados na Fig. 4. As termopilhas estão instaladas no extrator de calor com os circuitos de termopares depositados na face inferior do substrato (acrílico), em cuja face superior encontra-se aplicado o absorvedor térmico, composto por tinta branca ou preta conforme o caso. As termopilhas foram elaboradas através de técnicas fotolitográficas e de evaporação metálica, seguindo-se metodologia desenvolvida por Escobedo (1987).



**Figura 4** - Desenho esquemático das termopilhas do tipo: (a) estrela e (b) disco concêntrico, empregadas nos protótipos P1 e P2, respectivamente.

**Figure 4** - Drawing diagrams of the thermopiles (a) star, (b) disk-concentric, used in the prototypes P1 and P2, respectively.

O piranômetro de referência PBW é do tipo "Black-and-White" modelo 8-48, No. 28455. O piranômetro de referência PSP2 é do tipo PSP ("Precision Spectral Pyranometer"), modelo 2, No. 28513F3. Neste estudo foi utilizado como sensor padrão um piranômetro PSP modelo 2, No. 28120F3. Este piranômetro está indicado por PSP1. Estes instrumentos foram construídos por "The Eppley Laboratory Inc."<sup>1</sup>, e suas principais características podem ser encontradas na literatura (p.ex.: Iqbal, 1983, pp.354-355). O instrumento PSP1 foi adotado como padrão neste estudo em virtude de seu pouco uso desde a calibração original de fábrica (30 de julho de 1990). Comparações recentes (28 de março de 1995) entre este instrumento e um análogo que também tem sido pouco usado (piranômetro tipo PSP modelo 2, No. 17673F3) mostraram que a calibração de fábrica permanece válida em primeira aproximação, admitindo-se incertezas da ordem de  $\pm 1\%$ .

O sistema de aquisição de dados consiste de um conversor analógico-digital associado a um multiplexador com 8 canais, construído por "Campbell Scientific Inc."<sup>2</sup>. Neste estudo foram coletados dados a cada segundo, armazenados na forma de médias (sobre intervalos de tempo com duração de 1 ou 5 minutos conforme o caso) em uma memória circular com capacidade máxima de 19000 valores e posteriormente transferidos para um microcomputador padrão IBM-PC via cabo serial.

## METODOLOGIA DE CALIBRAÇÃO

Seguindo as recomendações da OMM a constante de calibração de piranômetros deve ser calculada através da média dos valores individuais das constantes de calibração obtidos para dias de céu com diferentes condições de nebulosidade (Frohlich & London, 1986, p.70), segundo a expressão:

$$k_p = k_R \left( \overline{V_p / V_R} \right) \quad (1)$$

sendo que  $k_p$  e  $k_R$  são as constantes de calibração dos piranômetros protótipo e referência,  $V_p$  e  $V_R$  são seus respectivos sinais, medidos em volts, e  $(\overline{\quad})$  representa a média dos valores individuais do quociente entre estes sinais. No texto, este método será referido como método do quociente.

<sup>1</sup> Os autores se excluem de qualquer recomendação referente aos equipamentos fabricados pela "The Eppley Laboratory Inc".

<sup>2</sup> Os autores se excluem de qualquer recomendação referente aos equipamentos fabricados pela "The Campbell Inc".

A OMM recomenda que a calibração seja feita a partir de observações obtidas quando o sol encontra-se a ângulos zenitais inferiores a 60 graus (CIMO, 1987). Além disso, é aconselhado pela OMM que sensores de radiação solar de uso contínuo sejam aferidos a cada 6 meses. O método recomendado pela OMM apresenta melhores resultados quando os valores de irradiância solar são suficientemente grandes e conseqüentemente os erros relativos suficientemente pequenos. Esta restrição indica que este método é mais adequado nas condições de céu claro.

Por outro lado, no caso de calibrações entre piranômetros com concepções diferentes, a OMM recomenda a utilização de observações efetuadas nas mais diversas condições possíveis, incluindo condições de céu encoberto (pág. 9.23, OMM, 1971).

Sob condições de céu encoberto deve-se calcular a constante de calibração através do coeficiente angular da reta de regressão ajustada pelo método dos mínimos quadrados passando pela origem do sistema de coordenadas. Neste caso a constante de calibração é obtida através da seguinte relação:

$$K_p = ak_R \quad (2)$$

sendo "a" o coeficiente angular da reta " $V_p = a V_R$ ". No texto, este método será referido como método da regressão.

## AFERIÇÃO DOS PIRANÔMETROS DE REFERÊNCIA

Para calibrar os protótipos é necessário utilizar como referência piranômetros aferidos. Tendo em vista que os piranômetros de referência (PSP2 e PBW) encontravam-se em uso por um período maior do que o recomendado pela WMO, foi necessário submetê-los a uma aferição antes de adotá-los como referência.

A aferição dos piranômetros de referência foi realizada usando observações simultâneas de irradiância solar global, efetuadas em São Paulo entre 30 de janeiro e 3 de fevereiro de 1995. Neste período, o sol posicionava-se dentro da faixa de ângulo zenital inferior a 60 graus entre 08:00 e 17:00 Hora Local (HL).

A comparação prévia (março de 1992) efetuada entre PSP1 e PSP2, com ambos praticamente sem uso desde a calibração em fábrica, permitiu encontrar um valor para  $k_{PSP2}$  de  $8,589 \pm 0,003 \mu V/(W.m^{-2})$ , indicando um excelente acordo com o valor proposto pelo fabricante.

| Período (local)                          | Informações de calibração      | $k_{PSP1}$ ( $\mu V/W.m^{-2}$ ) | $k_{PSP2}$ ( $\mu V/W.m^{-2}$ ) | $k_{PBW}$ ( $\mu V/W.m^{-2}$ ) | $k_{P1}$ ( $\mu V/W.m^{-2}$ ) | $k_{P2}$ ( $\mu V/W.m^{-2}$ ) |
|--|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 1990 (EUA)                               | Não fornecidas pelo fabricante | $8,53 \pm 0,09$                 | $8,55 \pm 0,09$                 | $8,62 \pm 0,09$                | -                             | -                             |
| 12 à 21 de março 1992 (Iperó)            | Método: Quociente              | -                               | $8,589 \pm 0,003$               | -                              | -                             | -                             |
|  | Método: Regressão              | -                               | 8,58                            | -                              | -                             | -                             |
|  | Referência                     | -                               | PSP1                            | -                              | -                             | -                             |
|  | Nº de obs.                     | -                               | 502                             | -                              | -                             | -                             |
|  | Radiação                       | -                               | Global                          | -                              | -                             | -                             |
| 28 à 30 de junho 1994 (SP)               | Método: Quociente              | -                               | -                               | -                              | $10,53 \pm 0,02$              | $8,61 \pm 0,01$               |
|  | Método: Regressão              | -                               | -                               | -                              | 10,64                         | 8,61                          |
|  | Referência                     | -                               | -                               | -                              | PBW                           | PSP2                          |
|  | Nº de obs.                     | -                               | -                               | -                              | 365                           | 365                           |
|  | Radiação                       | -                               | -                               | -                              | Global                        | Difusa                        |
| 30 de janeiro a 3 de fevereiro 1995 (SP) | Método: Quociente              | $8,53 \pm 0,09$                 | $8,131 \pm 0,003$               | $9,23 \pm 0,02$                | -                             | -                             |
|  | Método: Regressão              | -                               | 8,19                            | 8,97                           | -                             | -                             |
|  | Referência                     | PSP                             | PSP1                            | PSP1                           | -                             | -                             |
|  | Nº de obs.                     | -                               | 1451                            | 1451                           | -                             | -                             |
|  | Radiação                       | Global                          | Global                          | Global                         | -                             | -                             |

**Tabela 1** - Resultados da aferição dos piranômetros de referência e dos protótipos através dos métodos do quociente e da regressão.

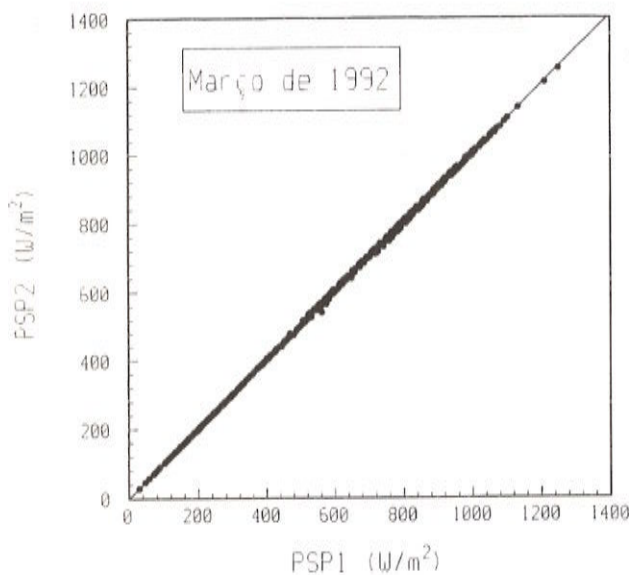
*Table 1* - Results corresponding to the calibration of the pyranometers based upon the method of quotient and regression.

O valor encontrado para a constante de calibração do PSP2 através do método do quociente é de  $8,131 \pm 0,003 \mu V/(W.m^{-2})$ , cerca de 5% menor do que o valor indicado pelo fabricante (Tab. 1). O valor encontrado usando o método da regressão é de  $8,19 \mu V/(W.m^{-2})$ . Este valor é muito próximo ao obtido pelo método do quociente, indicando que as características do PSP2 realmente foram modificadas durante o seu tempo de uso (11 meses).

A causa mais provável para a discrepância encontrada é o envelhecimento do sensor do PSP2. O envelhecimento é natural em todos os sensores de radiação e manifesta-se através da diminuição sistemática da constante de calibração com o tempo, tornando o instrumento cada vez menos sensível. Em geral este envelhecimento é da ordem de 1% ao ano. O envelhecimento de 5% em 11 meses de exposição contínua do PSP2 pode ser indentificado comparando-se a Fig. 5 (instrumento novo) com a Fig. 6 (após 11 meses de uso contínuo). Note a significativa alteração do coeficiente angular da reta de regressão correspondente às duas ocasiões em que os piranômetros foram comparados. A

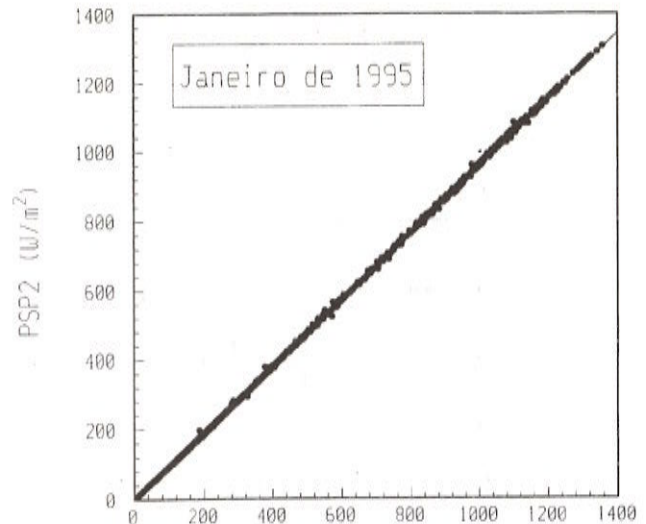
visualização do envelhecimento do PSP2 só foi possível porque os valores de irradiância apresentados nas Figs. 5 e 6 foram obtidos utilizando as constantes de calibração fornecidas pelos fabricantes.

No caso do método do quociente, o valor encontrado para PBW é de  $9,23 \pm 0,02 \mu\text{V}/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$ , cerca de 7% maior do que o valor proposto pelo fabricante (Tab. 1). No caso do método da regressão, o valor obtido é de  $8,97 \mu\text{V}/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$ , cerca de 4% maior do que a constante de fábrica. O método da regressão forneceu um resultado mais próximo do proposto pelo fabricante. A concentração dos pontos amostrais ao longo da reta de regressão na Fig. 7 indica que o resultado acima é significativo. A maior dispersão dos pontos amostrais na curva de aferição do PBW (Fig. 7) em relação ao PSP2 (Fig. 5 e 6) deve-se às diferenças entre as constantes de tempo do BPW (3 segundos) e do PSP1 e PSP2 (1 segundo).



**Figura 5** - Comparação entre os piranômetros PSP1 e PSP2. Valores médios de irradiância solar global calculados em intervalos de 5 minutos e observados no período de 14 a 20 de março de 1992, em Iperó (SP), conforme Oliveira et al. (1994). A curva contínua corresponde à reta de regressão que foi ajustada através do método dos mínimos quadrados passando pela origem.

**Figure 5** - Comparison between the pyranometers PSP1 and PSP2. Mean values of solar global irradiance over 5 minutes observation periods and measured from march 14 to 20, 1992, in Iperó (SP), according to Oliveira et al. (1994). The continuous line corresponds to the linear regression curve obtained from the regression method.



**Figura 6** - Idem Fig. 5, considerando valores médios de irradiância solar global sobre intervalos calculados em intervalos de 1 minuto e observados no período de 30 de janeiro a 3 de fevereiro de 1995, na cidade de São Paulo.

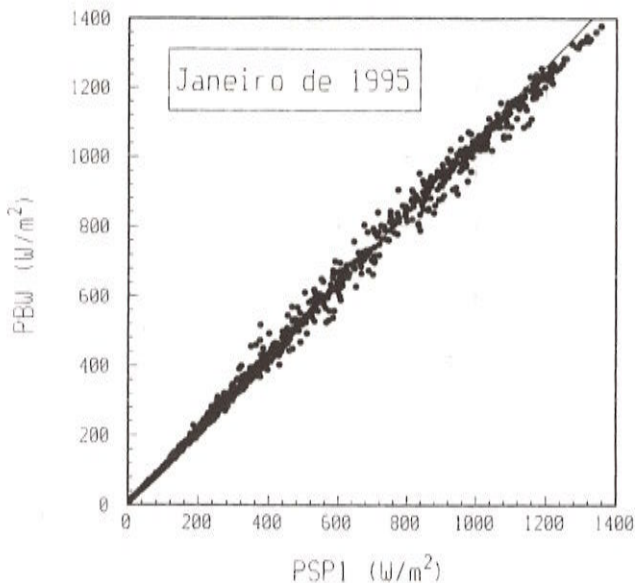
**Figure 6** - Same as Fig. 5, but considering mean values of solar global irradiance evaluated over 1 minute intervals and measured from January 30 to February 2, 1995, in the city of São Paulo.

Existem três possíveis causas para a discrepância entre o valor de  $k_{\text{PBW}}$  calculado e o proposto pelo fabricante: envelhecimento; erro de calibração de fábrica e erro sistemático associado à comparação de instrumentos com diferentes concepções de medidas.

A primeira hipótese não explica as variações encontradas, pois o envelhecimento do PBW deveria provocar uma diminuição da sua constante com o tempo de uso e não o aumento observado.

Gulbrandsen (1978) tem detectado erros sistemáticos nas medições efetuadas com piranômetros similares ao PSP1, cujos elementos sensíveis incluem junções frias sombreadas e junções quentes expostas à radiação solar. Entretanto, tais erros sistemáticos apresentam magnitude desprezível para piranômetros similares ao PBW, cuja concepção permite a exposição à radiação solar das junções quentes e frias. Portanto a hipótese de erro sistemático associado à concepção física dos instrumentos pode ser aplicada neste caso, tendo em vista que as maiores discrepâncias foram obtidos quando o PBW foi comparado com o PSP1. A hi-

pótese de erro de calibração de fábrica também não pode ser totalmente descartada.



**Figura 7** - Comparação entre os piranômetros PSP1 e PBW. Valores médios de irradiância solar global calculados em intervalos de 1 minuto e observados no período de 30 de janeiro a 3 de fevereiro de 1995, na cidade de São Paulo. A curva contínua corresponde à reta de regressão que foi ajustada através do método dos mínimos quadrados passando pela origem.

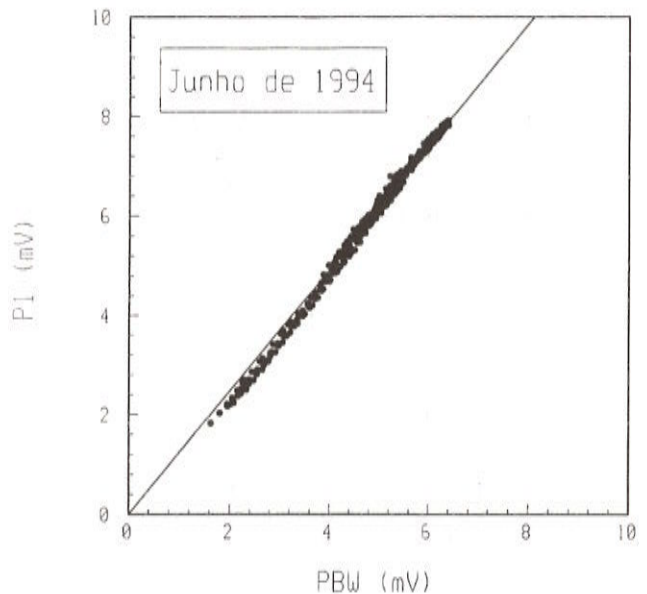
*Figure 7 - Comparison between the pyranometers PSP1 and PBW. Mean values of solar global irradiance evaluated over 1 minute intervals and measured from January 30 to February 2, 1995, in the city of São Paulo. The continuous line corresponds to the linear regression curve obtained from the regression method.*

Apesar das discrepâncias encontradas na aferição dos piranômetros de referência (PSP2 e PBW), neste estudo serão utilizadas as respectivas constantes de calibração fornecidas pelo fabricante (Tab. 1). Esta consideração baseia-se na falta de informações conclusivas que permitam determinar de forma inequívoca as causas destas discrepâncias. A investigação das possíveis causas utilizando um conjunto mais robusto de dados está em andamento e será apresentada em um trabalho futuro.

## CALIBRAÇÃO DOS PIRANÔMETROS PROTÓTIPOS

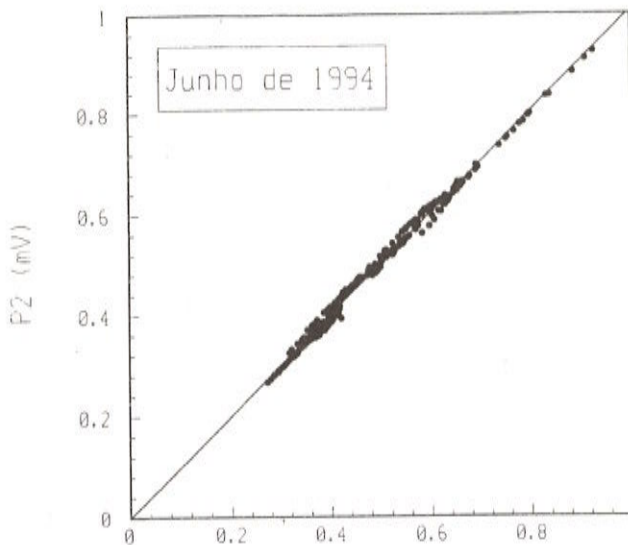
A calibração dos protótipos foi realizada através de medições simultâneas de irradiância solar global com os piranômetros PBW e P1 e de irradiância difusa com os piranômetros PSP2 e P2. A calibração do protótipo P2 através de medidas de radiação difusa (procedimento não recomendado pela OMM) foi realizada para verificar o desempenho deste piranômetro sob condições mais próximas às de operação. Neste caso, foram utilizadas as medidas efetuadas entre 26 e 30 de junho de 1994. Neste período, o sol posicionava-se dentro da faixa de ângulo zenital inferior a 60 graus entre 10:00 e 16:00 Hora Local (HL).

A concordância entre as observações e suas respectivas retas de regressão indicam que os dois protótipos apresentam uma correspondência linear adequada com os piranômetros de referência (Figs. 8 e 9).



**Figura 8** - Comparação entre os piranômetros protótipo P1 e de referência PBW. Valores médios de irradiância solar global calculados em intervalos de 5 minutos e observados no período de 26 a 30 de junho de 1994, na cidade de São Paulo. A curva contínua corresponde a reta de regressão que foi ajustada através do método dos mínimos quadrados passando pela origem.

*Figure 8 - Comparison between the pyranometers prototype P1 and reference (PBW). Mean values of solar global irradiance evaluated over 5 minutes period and measured from June 26 to 30, 1994, in the city of São Paulo. The continuous line corresponds to the linear regression curve obtained from the regression method.*



**Figura 9** - Idem Fig. 8, para os piranômetros protótipo P2 e de referência PSP2 e para a radiação solar difusa.

**Figure 9** - Same as Fig. 8, but for the pyranometers prototype P2 and reference PSP2 and for the diffuse component of solar radiation.

As constantes de calibração do protótipo P1 obtidas através das Eqs. (1) e (2) são respectivamente  $10,53 \pm 0,02 \mu\text{V}/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$  e  $10,64 \mu\text{V}/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$ . Para P2 as Eqs. (1) e (2) forneceram constantes de calibração iguais a  $8,61 \pm 0,01 \mu\text{V}/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$  e  $8,61 \mu\text{V}/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$ . Não existe discrepância significativa entre os resultados obtidos pelos dois métodos (Tab. 1). A dispersão entre os pontos amostrais apresentados nas Figs. 8 e 9 deve-se às diferenças nas constantes de tempo e no desempenho dos instrumentos frente às variações das condições ambientais. No caso do P1, o desvio da linearidade para os valores pequenos de irradiância (Fig. 8) pode estar associado ao efeito cosseno, discutido a seguir.

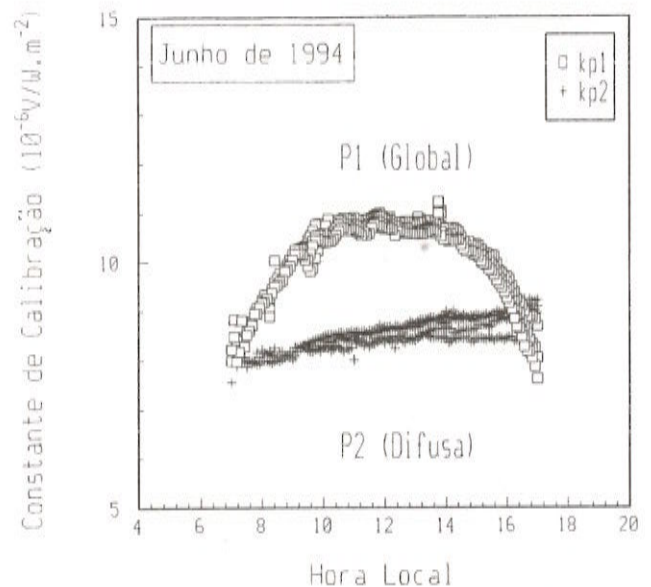
## EFEITOS COSSENO E TEMPERATURA

O maior impacto da poluição sobre a radiação solar ocorre durante o período da manhã, quando a inversão térmica impede a diluição dos poluentes produzidos na superfície (Peterson et al., 1978). Neste caso, torna-se importante saber qual é o efeito da utilização destas constantes de calibração na avaliação das componentes da radiação solar fora do horário recomendado pela OMM.

Na tentativa de avaliar este efeito, foram incluídas no cálculo das constantes de calibração as observações de radiação solar obtidas antes das 10:00 HL e depois das 16:00 HL. O método utilizado foi o do quociente.

A evolução diurna das constantes de calibração depende da componente da radiação solar utilizada no cálculo. No caso da radiação solar global, a constante do protótipo P1 apresenta uma evolução diurna significativa e simétrica em torno do meio-dia (Fig. 10). Este comportamento pode ser atribuído aos erros sistemáticos produzidos pelas irregularidades da cúpula do protótipo. Neste caso, a constante de calibração varia em função da posição do sol, resultando no chamado efeito cosseno.

No caso da radiação solar difusa, a constante do protótipo P2 cresce monotonicamente ao longo do dia (Fig. 10). Neste caso, a variação da constante de calibração está associada à variação do zero do piranômetro de referência (PSP2). Este efeito é induzido pelo aquecimento diurno do corpo do sensor e manifesta-se através de um aumento progressivo da constante de calibração, resultando no chamado efeito de temperatura.



**Figura 10** - Variação da constante de calibração em função do cosseno da distância zenital solar dos protótipos P1 (radiação global) e P2 (radiação difusa). Valores médios de irradiância calculados em intervalos de 5 minutos e observados no período de 26 a 30 de junho de 1994, na cidade de São Paulo.

**Figure 10** - Evolution of the calibration constant as function of the cosine of solar zenith angle for the prototypes P1 (global radiation) and P2 (diffuse radiation). Mean values of irradiance evaluated over 5 minutes intervals and measured from June 26 to 30, 1994, in the city of São Paulo.



Assim, o protótipo P1 (calibrado a partir das observações de radiação solar global) subestima a irradiância solar fora do período recomendado para calibração. O protótipo P2 (calibrado a partir da radiação solar difusa) subestima a irradiância solar antes das 10:00 HL e a superestima após as 16:00 HL.

## ANÁLISE PRELIMINAR DE DOIS CONJUNTOS DE DADOS

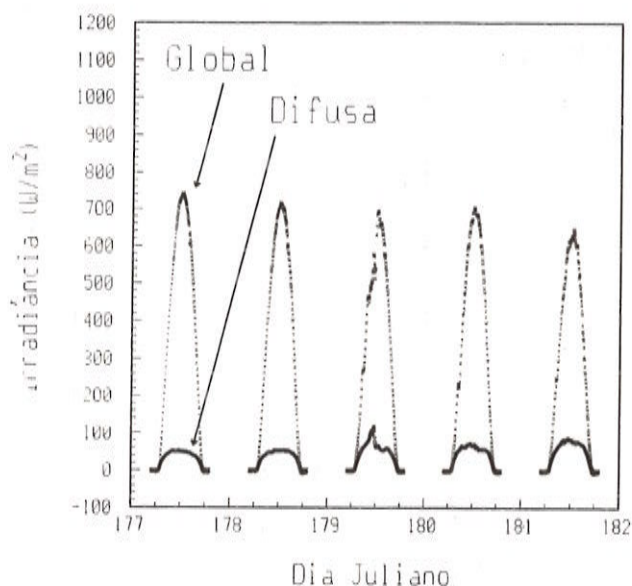
As medidas de irradiância solar global e difusa efetuadas com os piranômetros PBW e PSP2 sobre o edifício do IAG-USP constituem um importante acervo de dados e podem contribuir para diversos estudos meteorológicos na cidade de São Paulo. Dois exemplos são explorados abaixo. No primeiro exemplo a variação da turbidez atmosférica é associada ao aumento da poluição atmosférica. O segundo exemplo mostra a evolução temporal das componentes de radiação solar durante um eclipse parcial do sol e suas implicações na camada limite planetária.

## TURBIDEZ ATMOSFÉRICA

O grau de contaminação da atmosfera quanto a presença de material particulado em suspensão (aerossol) pode ser indicado, sob o ponto de vista óptico, pela turbidez atmosférica em analogia à turbidez apresentada por meios líquidos em química. De acordo com Braslau & Dave (1973a, 1973b), o aumento da turbidez atmosférica deve ocasionar (a) diminuição da irradiância solar direta, por espalhamento e absorção, (b) intensificação da irradiância difusa proveniente do céu, produzida principalmente por espalhamento de radiação solar direta, e (c) como resultado final, diminuição da irradiância solar global. Tais efeitos podem apresentar uma significativa dependência espectral conforme a natureza físico-química e a distribuição dos tamanhos das partículas em suspensão. Resultados experimentais obtidos em áreas urbanas têm mostrado que a redução da irradiância solar global em relação a situações atmosféricas límpidas pode alcançar 23-24% na região espectral 0,45-0,70  $\mu\text{m}$  (Randerson, 1970).

Efeitos semelhantes podem ser observados na região metropolitana de São Paulo, como mostram as evoluções diurnas observadas ao longo do período de 26 a 30 de junho 1994 para as irradiâncias solar global e difusa (Fig.

11). Este período caracterizou-se pela presença de um anticiclone sobre a região de São Paulo, cuja penetração entre os dias 25 e 26 foi precedida por intensa precipitação. As irradiâncias medidas no dia 26 foram tomadas como referência à turbidez atmosférica (Fig. 12), como sugerem os baixos valores de concentração de material particulado medidos em Cerqueira César pela CETESB (Bruni, 1995), a aproximadamente 4 km da Cidade Universitária. Os valores máximos de irradiância solar global e difusa observados em torno do meio-dia solar atingiram, aproximadamente, 740 e 49  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$  no dia 26. No dia 30, após 4 dias sem chuva e na quase total ausência de nebulosidade, estes mesmos valores máximos atingiram, respectivamente, 650 e 77  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$  (Tab. 2).



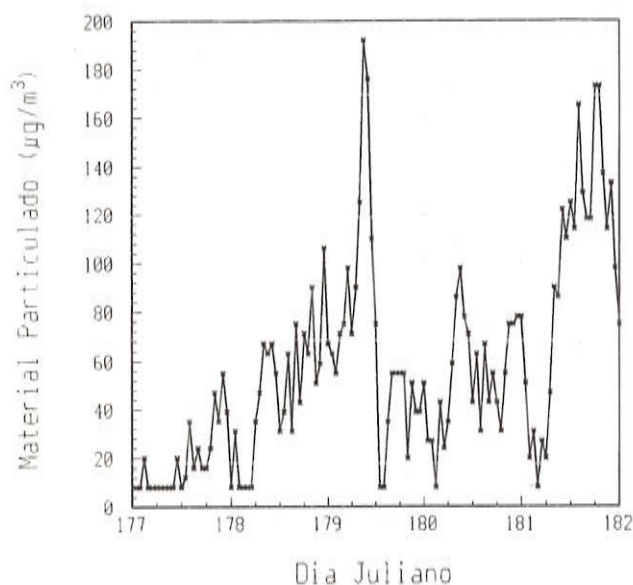
**Figura 11** - Evolução temporal da irradiância solar global e difusa corrigida determinada, respectivamente, com os piranômetros PBW e PSP2. Valores médios de irradiância solar global calculados em intervalos de 5 minutos e observados no período de 26 a 30 de junho de 1994 (dias Julianos 177-181), na cidade de São Paulo.

*Figure 11* - Time evolution of the global and diffuse solar irradiance observed by the pyranometers PBW and PSP2, respectively. Mean values of solar global and diffuse irradiance evaluated over 5 minutes intervals and measured from June 26 to 30 1994 (Julian days 177-181), in the city of São Paulo.

| Dia Juliano<br>(Data) | global<br>(MJ.m <sup>-2</sup> ) | difusa<br>(MJ.m <sup>-2</sup> ) | direta<br>(MJ.m <sup>-2</sup> ) | transmitância<br>para<br>radiação direta |
|-----------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--|
| 177<br>(26/06/1994)   | 17,14                           | 1,51                            | 15,63                           | 0,73                                     |
| 178<br>(27/06/1994)   | 16,37                           | 1,60                            | 14,78                           | 0,69                                     |
| 179<br>(28/06/1994)   | 14,57                           | 2,16                            | 12,49                           | 0,58                                     |
| 180<br>(29/06/1994)   | 15,61                           | 2,03                            | 13,59                           | 0,64                                     |
| 181<br>(30/06/1994)   | 14,11                           | 2,35                            | 11,96                           | 0,55                                     |

**Tabela 2** - Totais diários para irradiância solar global, difusa corrigida e direta, e valor médio diário da transmitância (radiação direta), calculados a partir das observações efetuadas no período de 26 a 30 de junho de 1994 (dias Julianos 177-181), na cidade de São Paulo.

**Table 2** - Integrated values of global, diffuse corrected and direct solar irradiance and mean values of transmittance for direct solar radiation evaluated over a 24 hours intervals and measured from June 26 to 30, 1994 (Julian days 177-181), in the city of São Paulo.



**Figura 12** - Evolução temporal de medidas de concentração de material particulado em suspensão efetuadas pela CETESB, ao

Valores de transmitância para radiação direta foram obtidos através do quociente entre o total diário de irradiância solar direta e o respectivo valor teórico incidente no topo da atmosfera, ambos em superfícies horizontais. Esta transmitância refere-se ao efeito resultante de diversos processos capazes de atenuar a radiação solar direta: espalhamento e absorção por nuvens e aerossol, espalhamento molecular, absorção por vapor d'água e ozônio (entre outros compostos moleculares). O período de 26 a 30 de junho de 1994 foi caracterizado pela virtual ausência de nuvens. O conteúdo integrado em vapor d'água na atmosfera aumentou de forma significativa ao longo do período estudado, de 0,33 (manhã do dia 26) para 1,09 g/cm<sup>2</sup> (manhã do dia 30), fazendo a transmitância associada ao vapor d'água sobre todo o espectro solar diminuir de 91% para 87% às 9 horas da manhã (Plana-Fattori, 1995). Pode-se dizer, assim, que a redução de 73 a 55% da transmitância para radiação solar direta entre os dias 26 e 30 de junho de 1994 deve-se sobretudo ao aumento da turbidez atmosférica. Deve ser ressaltado que o efeito do anel de sombreamento sobre a radiação difusa foi levado em conta através da multiplicação do valor observado por um fator de correção igual a 1,095. Este fator foi calculado a partir das características do anel de sombreamento, da latitude local e declinação solar de acordo com Melo (1993). Apesar de aumentar em quase 10% a radiação difusa esta correção não alterou significativamente a transmissividade da atmosfera para radiação direta.

Verifica-se, desta forma, uma clara correlação entre o aumento da concentração de material particulado no ar e a atenuação da radiação solar direta na cidade de São Paulo. Estudos mais aprofundados a este respeito acham-se em preparação no Departamento de Ciências Atmosféricas (IAG-USP), buscando avaliar o impacto do aerossol urbano sobre o balanço energético na Região Metropolitana de São Paulo.

## ECLIPSE SOLAR

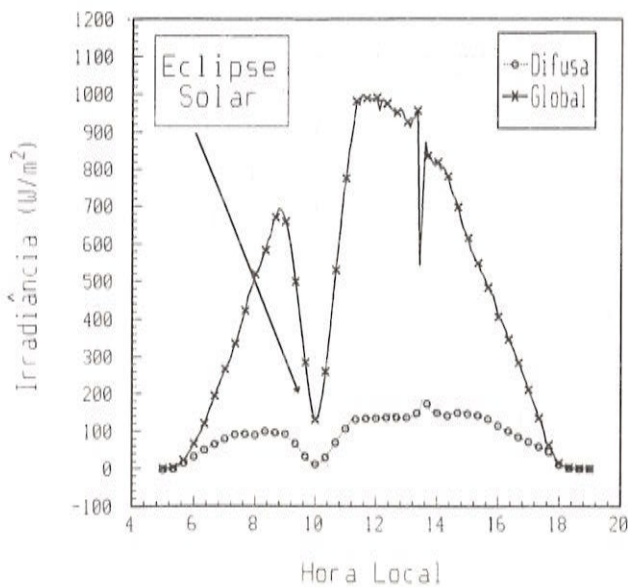
Um eclipse solar, ainda que parcial, constitui um dos fenômenos com maior impacto sobre o ciclo diurno de irradiâncias recebidas no nível do solo. Este impacto pode, eventualmente, ser capaz de alterar a evolução diurna da

longo do período de 26 a 30 de junho de 1994 (dias Julianos 177-181) no bairro de Cerqueira César, na cidade de São Paulo.

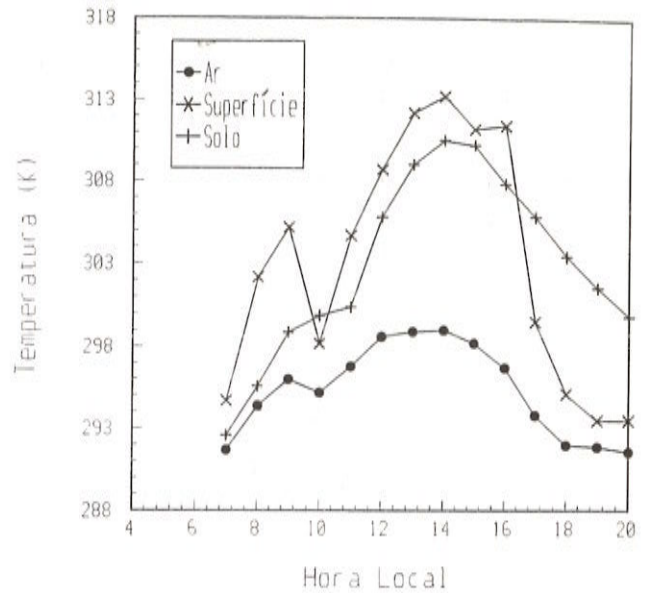
**Figure 12** - Time evolution of the particulate concentration in the air, observed by CETESB. Mean values evaluated over 1 hour intervals and measured from June 26 to 30, 1994 (Julian days 177-181), at Cerqueira César district, in the city of São Paulo.

camada limite planetária e da condutividade elétrica da baixa atmosfera (Manohar et al., 1995).

No caso estudado, associado ao sombreamento de aproximadamente 85% do disco solar aparente (Boczko, 1994, p.207), foram observadas reduções da ordem de 85% para a irradiância solar global e de 95% para a irradiância difusa (Fig. 13). O impacto sobre a estrutura térmica na interface solo-atmosfera mostrou-se tão mais intenso quanto maior a proximidade do nível da superfície, evidenciando a importância dos processos de aquecimento (ou resfriamento) radiativos sofridos pelas camadas superficiais de solo. Verificou-se que a temperatura de superfície, medida através de um termômetro de mercúrio instalado a alguns milímetros de profundidade, tornou-se menor que a temperatura a 5 centímetros de profundidade, caracterizando um regime de fluxo de calor por condução semelhante àquele observado durante o período noturno (Fig. 14). A temperatura do ar, em abrigo meteorológico, sofreu redução da ordem de 2 K. Não foram registradas modificações significativas na velocidade do vento a 10 metros de altura, muito embora tenham sido observadas rajadas significativas na Cidade Universitária nos minutos que sucederam o máximo sombreamento do disco solar. Por outro lado, observações da velocidade do vento em 10 e 80 m, realizadas em Iperó, cerca de 80 km a oeste da cidade de São Paulo, indicaram uma redução na intensidade e na variabilidade da direção do vento, entre 10:00 e 12:00 HL (Fig. 15) a qual parece estar associada a um aumento da estabilidade estática da camada limite superficial durante o eclipse.



**Figura 13** - Evolução temporal das medidas de irradiância solar global e difusa efetuadas, respectiva-

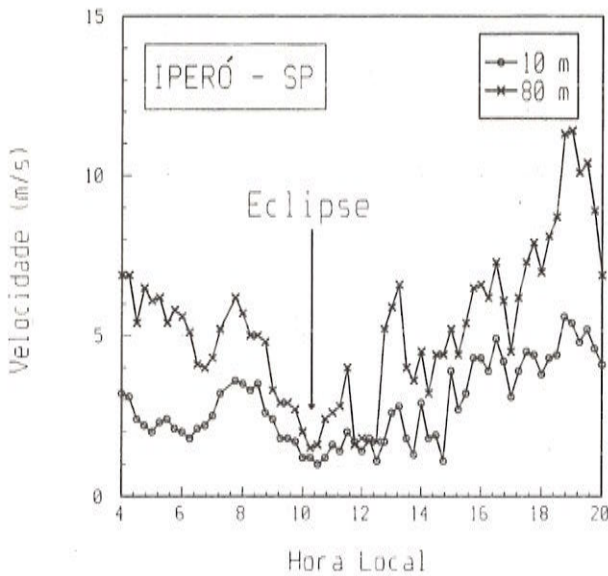


**Figura 14** - Evolução temporal da temperatura do ar a 1,5 m de altura ( $T$ ), temperatura de superfície ( $T_{sup}$ ) e temperatura do solo a 5 centímetros de profundidade ( $T_{solo}$ ), observada durante o eclipse solar ocorrido no dia 3 de novembro de 1994. Estes dados correspondem a leituras instantâneas efetuadas na Estação Meteorológica do IAG-USP, no Parque do Estado, na cidade de São Paulo.

*Figure 14* - Time evolution of the air temperature at 1.5 m ( $T$ ), surface temperature ( $T_{sup}$ ) and soil temperature at 5 centimeter deep ( $T_{solo}$ ), observed during the solar eclipse of November 3, 1994. Instantaneous values measured each one hour at the Meteorological Station of IAG-USP, at "Parque do Estado", in the city of São Paulo.

mente, com os piranômetros PBW e PSP2, durante o eclipse solar ocorrido no dia 3 de novembro 1994, na cidade de São Paulo.

*Figure 13* - Time evolution of the global and diffuse solar irradiance observed by the pyranometers PBW and PSP2, observed during the solar eclipse of November 3, 1994. Mean values of solar evaluated over 5 minutes intervals and measured in the city of São Paulo.



**Figura 15** - Evolução temporal da direção do vento a 10 e 80 m de altura, observada durante o eclipse solar ocorrido no dia 3 de novembro de 1994. Valores médios calculados em intervalos de 20 minutos e observados em Iperó (SP).

**Figure 15** - Time evolution of the wind direction at 10 and 80 m, observed during the solar eclipse of November 3, 1994. Mean values evaluated over 20 minutes intervals and measured in Iperó (SP).

Alterações similares dos parâmetros meteorológicos têm sido documentadas por Fernández et al. (1993). Particularmente interessante foram as ocorridas durante o eclipse solar total em julho de 1991 na Costa Rica. Neste caso, o céu também estava sem nuvens e observou-se um resfriamento de 2 a 5 K do ar próximo à superfície, e uma diminuição significativa da velocidade do vento. Conclui-se que mesmo um eclipse solar de 85 % pode acarretar uma série de conseqüências sobre a estrutura da camada limite planetária, modificando a magnitude e o sentido dos fluxos energéticos na interface solo-atmosfera, de maneira análoga aos eclipses solares totais.

## CONCLUSÕES

Dois métodos de calibração (método do quociente e da regressão) são aplicados para determinar a constante de calibração de dois protótipos de piranômetros desenvolvidos pelo Grupo de Radiometria Solar da UNESP, Botucatu,

utilizando medidas de radiação solar efetuadas através da plataforma radiométrica instalada no prédio do IAG, localizado no campus da USP na cidade de São Paulo.

Os protótipos P1 e P2 apresentaram constantes de calibração em torno de  $10,53 \pm 0,02$  e de  $8,61 \pm 0,01 \mu\text{V}/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$  utilizando o método do quociente e de  $10,64$  e  $8,61 \mu\text{V}/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$  utilizando o método da regressão. Estes valores foram obtidos considerando somente os valores médios de irradiância, observados em intervalos de cinco minutos, entre 10:00 e 16:00 HL. Neste caso específico os dois métodos se equivalem.

Devido ao efeito cosseno, a utilização do protótipo P1 fora do horário empregado para determinar a sua constante solar (10-16:00 HL) subestima a radiação solar incidente na superfície. Devido ao efeito de temperatura, a utilização do protótipo P2 implica a subestimativa da radiação solar no período da manhã (antes das 10:00 HL) e na superestimativa no período da tarde (após as 16:00 HL).

Verificou-se neste trabalho, algumas discrepâncias no comportamento dos piranômetros de referência (PSP2 e PBW) após 11 meses de uso contínuo. Entre elas destacam-se: (a) redução na constante de calibração do PSP2 de 4% (com ambos os métodos) associada a um possível efeito de envelhecimento do sensor; (b) aumento na constante de calibração do PBW de 7% com o método do quociente e de 4% com o método da regressão, associadas as diferenças na disposição dos elementos sensíveis do PBW e o PSP1 ou mesmo a um possível erro de calibração de fábrica. Neste caso os dois métodos não se equivaleram totalmente.

Assim, as discrepâncias entre as medidas obtidas pelos piranômetros padrão e de referência reforçam a necessidade de seguir a recomendação da OMM de aferir a cada 6 meses qualquer piranômetro em exposição contínua. Além disso, para evitar erros sistemáticos torna-se necessário que a aferição seja feita sempre entre piranômetros de mesma concepção.

Baseado nos resultados obtidos neste trabalho (Tab. 1) não é possível afirmar que o método da regressão seja superior ao do quociente nas condições de céu encoberto. Surpreendentemente, os dois métodos geraram valores equivalentes quando aplicadas as observações de radiação difusa.

As medidas de radiação solar global e difusa realizadas entre 26 e 30 de junho de 1994 indicaram que o progressivo aumento de aerossóis na Região Metropolitana de São Paulo, logo após a passagem de uma frente fria (25 de junho de 1994), foi responsável por uma diminuição da

transmitância atmosférica de 18%. As medidas de radiação solar durante o eclipse parcial de 3 de novembro de 1994 permitiram detectar uma redução de 85% na radiação global às 11:00 HL na cidade de São Paulo. As temperatura do ar e da superfície indicaram que a redução de 85% da radiação global induziu uma significativa estabilização na camada limite planetária na cidade de São Paulo. Estes dois exemplos mostram a importância do conjunto de dados que está sendo gerado através da plataforma radiométrica "Dr. Ernesto Caetano dos Santos Neto", instalada na cidade de São Paulo.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pela FAPESP (Proc. 90/4492-1, 92/3686-2 e 94/4778-3), FUNDUNESP (Proc. 92/435-DFP) e CNPq (Proc. 302624/88.0). Agradecimentos são dirigidos ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas da Secretaria de Ciência e Tecnologia do Estado de São Paulo, pelo empréstimo do piranômetro No. 17673F3; à Estação Meteorológica do IAG-USP, pela cessão de dados meteorológicos; à CETESB, pela cessão dos dados de concentração de material particulado; e ao Centro Experimental de Aramar do Ministério da Marinha, pela cessão dos dados de vento. Gostaria de agradecer aos revisores que contribuíram de maneira decisiva para a melhoria deste trabalho, sugerindo a utilização do método da regressão como uma alternativa válida para o cálculo da constante de calibração de piranômetros.

## REFERÊNCIAS

- BOCZKO, R.** -1994 - Anuário astronômico 1994. São Paulo, Instituto Astronômico e Geofísico da Universidade de São Paulo, 214 pp.
- BRASLAU, N. & DAVE, J. V.** - 1973a - Effect of aerosols on the transfer of solar energy through realistic model atmospheres. Part I: Non-absorbing aerosols. *Journal of Applied Meteorology*, **12**: 601-615.
- BRASLAU, N. & DAVE, J. V.** - 1973b - Effect of aerosols on the transfer of solar energy through realistic model atmospheres. Part II: Partly-absorbing aerosols. *Journal of Applied Meteorology*, **12**: 616-619.
- BRUNI, R.** -1995 - Comunicação pessoal - CETESB, São Paulo.
- CIMO (Comisión de Instrumentos y Métodos de Observación, Organización Meteorológica Mundial)** - 1987 - Primera comparación regional de la O.M.M. de pirheliómetros patrones nacionales de la A.R. III. Buenos Aires, Servicio Meteorológico Nacional de la República Argentina, 41pp.
- ESCOBEDO, J. F.** - 1987 - Refrigeração com uso de energia solar. Tese de Doutorado, Instituto de Física e Química de São Carlos - USP, São Carlos, 195pp.
- ESCOBEDO, J. F., SOUZA, J. L., RICIÉRI, R. P.** - 1994a - Termopilha de filmes finos por evaporação de metais. I - Metodologia. In "Energías limpias en progreso" (eds.: M.V. Vázquez e J.C.M. González), Anais do VII Congreso Ibérico de Energía Solar, vol. I, pp. 3-8.
- ESCOBEDO, J. F., SOUZA, J. L., RICIÉRI, R. P.** - 1994b - Termopilha de filmes finos por evaporação de metais. II - Aplicações na radiometria solar. In "Energías limpias en progreso" (eds.: M.V. Vázquez e J.C.M. González), Anais do VII Congreso Ibérico de Energía Solar, vol. I, pp. 9-14.
- FERNÁNDEZ, W., CASTRO, V. & HIDALGO, H.** - 1993 - Air temperature and wind changes in Costa Rica during the total solar eclipse of July 11, 1991. *Earth, Moon, and Planets*, **63**: 133-147.
- FROHLICH, C. & LONDON, J. (EDS.)** - 1986 - Revised instruction manual on radiation instruments and measurements. World Climate Research Program (WCRP), WMO - ICSU Joint Scientific Committee, publication WMO/TD No.149, 139 pp.
- GULBRANDSEN, A.** - 1978 - On the use of pyranometers in the study of spectral solar radiation and atmospheric aerosols. *Journal of Applied Meteorology*, **17**: 899-904.
- IQBAL, M.** - 1983 - An introduction to solar radiation. Academic Press, 390pp.
- MANOHAR, G. K., KANDALGAONKAR, S. S., KULKARNI, M. K.** - 1995 - Impact of a total solar eclipse on surface atmospheric electricity. *Journal Geophysical Research*, **100**: 20805-20814.
- MELO, J. M. D.** - 1993 - Desenvolvimento de um sistema para medir simultaneamente radiações global, difusa e direta. Tese de Doutorado, Faculdade de Ciências Agrônomicas, Unesp, Botucatu, 130 pp.
- OLIVEIRA, A. P., MORAES, O. L. L., DEGRAZIA, G. A. & MOLNARY** -1994 - Observational studies of the planetary boundary layer at sub-tropical regions of Brazil. *Revista Brasileira de Geofísica*, **12**: 55-58.
- OMM** - 1971 - Guide to meteorological instruments and observing practices. Fourth Edition, Geneva,

Secretariat of the World Meteorological Organization, publication WMO N° 8, 325 pp.

**PETERSON, J.T., FLOWERS, E.C., & RUDISILL, J.**

**H. - 1978** - Urban-rural solar radiation and atmospheric turbidity measurements in the Los Angeles Basin. *Journal of Applied Meteorology*, **17**: 1595-1609.

**PLANA-FATTORI, A. - 1996** - Revisiting parameterization for the solar broadband absorptance due to the atmospheric water vapor. (submitted to *Journal of the Atmospheric Sciences*).

**RANDERSON, D. - 1970** - A comparison of the spectral distribution of solar radiation in a polluted and a clear air mass. *Journal of the Air Pollution Control Association*, **20(8)**: 546-548.

Submetido em: 12/06/95

Revisado pelo(s) autor(es) em: 18/03/96

Aceito em: 20/06/96

(Vide Nota Sobre Os Autores na página 226.)

## MEASUREMENTS OF SOLAR RADIATION IN THE CITY OF SÃO PAULO: CALIBRATION OF PYRANOMETERS AND METEOROLOGICAL APPLICATIONS

The main goal of the project "Solar Radiation Station" is to develop radiometers that can be operated with a high precision for a long period of time. The pyranometer prototypes, built by the Group of Solar Radiometry, UNESP (Universidade do Estadual Paulista), Botucatu, have been evaluated by following the time evolution of their calibration constants. Two of these prototypes (P1 and P2) were set at the top of the building of the IAG-USP (Instituto Astronômico e Geofísico da Universidade de São Paulo), in the City of São Paulo (23°33'35"S, 46°43'55"W), located at 744 m above the mean sea level. Since March of 1994, solar radiation has been measured by these two prototypes simultaneously with two calibrated reference pyranometers (PSP2 and PBW). The prototype P1 contains a thermopile disposed in a "star" shape, with a diameter of 25 mm and 36 thermocouples of bismuth-antimony laid on plastic layer 1 mm wide. The prototype P2, contains a thermopile disposed in a "disc-concentric" shape, with a diameter of 32 mm and 36 thermocouples of bismuth-antimony laid on a plastic layer of the same thickness. The prototypes were placed over a platform with one shadow band. The prototype P1 was set uncovered to measure the global solar radiation and the prototype P2 was set under the shadow band to measure the diffuse solar radiation. A second platform was set up adjacent to the former, where a PSP (Precision Spectral Pyranometer), model 2 (PSP2), and a PBW (Black-and-White Pyranometer), model 8-48 (PBW), both from *The Eppley Laboratory Inc.* They were arranged on the platform so that the PBW measures global solar radiation and the PSP2 diffuse solar radiation. Another PSP pyranometer (PSP1) was utilized as standard pyranometer. Two methods were used to evaluate the calibration constants of the prototypes: the quotient method (recommended by the World Meteorological Organization, WMO) and the regression method. The calibration constants obtained from both methods did not show any significant discrepancies. Using the quotient method, the calibration constants for P1 and P2 are, respectively,  $10.53 \pm 0.02$  and  $8.61 \pm 0.01 \mu\text{V}/(\text{W}\cdot\text{m}^2)$ . Using the regression

method these constants are, respectively, 10.64 e  $8.61 \mu\text{V}/(\text{W}\cdot\text{m}^2)$ . A detailed analysis of the time evolution of the calibration constant for the prototypes indicated a diurnal variation that may be due to temperature and cosine effects. It was carried out a calibration of the pyranometers used as reference (PSP2 and PBW) after 11 months of continuous use with a standard pyranometer (PSP1). The results indicated a 5 % reduction in the calibration constant for the reference pyranometer PSP2 (associated to a probable aging effect) and an increasing between 4 and 7 % in the calibration constant of the reference pyranometer PBW (associated to the differences in the design of its sensitive element compared to PSP1 or even associated to a factory calibration problem). Global and diffuse solar radiation measurements carried out between June 26 and 30, 1994, indicated a decrease of 18% in the atmospheric transmittance associated with the air pollution in the City of São Paulo. On June 26, the maximum value of global and diffuse solar radiation, observed around noon, varied from 740 and 45  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$  to 650 and 70  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ , respectively. During this period the concentration of air particulate at 4 km from the radiation measurement site increased significantly. On the other hand, estimates of total precipitable water content indicated an increase of  $0.33 \text{ g}/\text{cm}^2$  (morning of June 26) to  $1.09 \text{ g}/\text{cm}^2$  (morning of June 30), and the air transmittance varied from 91 to 87%. Therefore the observed reduction from 73 to 55% in the air transmittance associated to the direct solar radiation in this period is due to the increase in the concentration of particulate in the air. Reductions of 85% for the global solar radiation and 95% for the diffuse solar radiation were observed during the partial solar eclipse on November 3, 1994. The available temperature data in the city of São Paulo indicated a cooling of between 2 K (at 1.5 m) and 5 K (surface). It was also identified a significant reduction in the wind speed in Iperó (80 km westward of the city of São Paulo). These effects indicate that the planetary boundary layer stabilization observed in São Paulo for a 85 % eclipse is comparable to more intense eclipse events.