

## INTERAÇÃO RADIAÇÃO SOLAR – ATMOSFERA NO NORDESTE DO BRASIL: ANÁLISE PRELIMINAR

JUAN CARLOS CEBALLOS<sup>1</sup>, EDUARDO JORGE DE BRITO BASTOS E  
BERNARDO BARBOSA DA SILVA

Núcleo de Meteorologia Aplicada – Departamento de Ciências Atmosféricas – Universidade Federal da Paraíba – PRAI – CCT  
58100 – Campina Grande, Paraíba, Brasil.

Actinographic data (global and diffuse solar radiation) from five stations laid out at approximately 7°S, between the Atlantic coast and about 450 km inland of the Paraíba State, Brazil, have been analysed. Only the data collected on clear (not cloudy) days have been considered. Under such atmospheric conditions, the data from all five stations exhibit similar behaviour. Global and direct daily irradiation (insolation) has essentially the same annual cycle, differing within 3-8%. Diffuse daily irradiation does not exceed 7% (winter) and 11% (summer) of the global irradiation. Global transmissivity measured for the wavelength interval of 0.4 – 2μm about 65%, and nearly constant during the year. Transmissivity for the directional fluxes ranges from 72 to 80%, for zenith angles up to about 45°.

Directional flux analysis permits a primary evaluation of atmospheric turbidity and maximum precipitable water. Inland, the latter would not exceed 0.9 g/cm<sup>2</sup> during dry season (June-July), and approximately 4.0 g/cm<sup>2</sup> during rainy season; Angstrom's turbidity factor should be less than 0.15.

The results suggest that regional evaluation of precipitable water by the use of radiation measurements, could be improved if calibrated with local radiosonde data.

### INTRODUÇÃO

Existem trabalhos de zoneamento de radiação solar no Nordeste do Brasil (SEPLANTEC/IV DISME, 1979; Sá, 1977; NMA, 1980), que avaliam radiação global diária média por planimetria de actinogramas e eventual análise de heliogramas. Os resultados representam valores médios de situações muito variáveis de nebulosidade e balanço radiativo da atmosfera, sendo de óbvia utilidade para fins agrometeorológicos ou de avaliação de fontes energéticas não convencionais. Todavia, uma análise mais detalhada das interações entre a radiação solar e a atmosfera requer medições complementares.

O presente trabalho constitui uma contribuição preliminar para a análise destas interações. Como primeira aproximação ao problema, tem-se abordado situações de céu predominantemente aberto, nas quais a presença de nuvens não interfere nos processos de absorção e dispersão de radiação solar na atmosfera.

Uma análise mais detalhada da radiação incidente à superfície implica em separar as radiações direta e difusa e em determinar o fluxo específico (ou densidade de fluxo, ou fluxo direcional),  $\Phi$ , definido como a energia por unidade de tempo que atravessa a unidade de área na direção dos raios solares. As estações da rede meteorológica do Nordeste dispõem, em geral e no máximo, de um heliógrafo e um actinógrafo. O primeiro determina em princípio o número de horas diárias com céu aberto (insolação) durante a passagem do Sol; o segundo mede o fluxo de radiação global

(direta mais difusa) incidente sobre seus sensores. Isoladamente, tais instrumentos não permitem determinar  $\Phi$ .

A Universidade Federal da Paraíba, através do Núcleo de Meteorologia Aplicada (NMA) e com o apoio do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), mantém uma rede solarimétrica de 16 estações (12 no Estado da Paraíba e o resto em outros estados do Nordeste). Nelas, além da insolação determina-se radiação global e difusa mediante um par de actinógrafos bimetálicos do tipo Robitzsch-Fuess (Fuess, 1962). Desta rede, foram escolhidos actinogramas correspondentes a cinco estações da Paraíba, localizadas em latitudes similares e cobrindo uma região que se estende desde o litoral (João Pessoa) até o alto sertão (Cajazeiras, a 450 km do Atlântico).

No que segue, apresentam-se as variações anuais observadas da irradiação global diária ( $G_d$ ), difusa diária ( $q_d$ ) e direta diária ( $Q_d$ ), assim como fluxo direcional  $\Phi$  em função do ângulo zenital do Sol. Finalmente, são tecidas considerações e feitas estimativas acerca do coeficiente de turbidez atmosférica e água precipitável na região.

### DADOS DISPONÍVEIS E CRITÉRIOS APLICADOS

Nos actinógrafos de radiação difusa, uma faixa de sombreamento evita a incidência dos raios solares diretos; o fluxo direcional pode ser avaliado mediante a expressão:

$$\Phi = (G - q) / \cos Z = Q \sec Z, \quad (1)$$

sendo  $G$  o fluxo (irradiância) de radiação global,  $q$  o fluxo de radiação difusa, e  $Z$  o ângulo zenital.  $Q$  representa a irradiância direta à superfície. A resolução formal dos instrumentos é de 0,05 ly/min; aplicado um fator sazonal de correção, o erro esperado de uma planimetria de radiação diária não deveria exceder 1-2%.

A irradiância indicada por um actinógrafo Fuess limita-se a um intervalo de comprimentos de onda que exclui radiação UV e IV com  $\lambda > 2\mu$ , conseqüentemente, tal intervalo corresponde aproximadamente a  $\Delta : (0,4 - 2\mu)$ .

As estações escolhidas para o estudo foram João Pessoa (latitude 7°07'S), Campina Grande (7°11'S), Patos (7°01'S), Pombal (6°45'S) e Cajazeiras (6°53'S). A primeira situa-se no litoral atlântico, e as seguintes são progressivamente mais afastadas do mar. Testes prévios de planimetria evidenciaram que em dias com ausência patente de nebulosidade, a irradiação entre o amanhecer e o meio-dia solar é essencialmente a mesma que na segunda metade do dia, dentro de 1-3%. Isto sugere que em dias tendo a manhã ou a tarde com céu encoberto pode-se ao menos analisar a metade restante do dia. Assim, foram escolhidos pares de actinogramas segundo os critérios que seguem: 1) carácter contínuo do registro actinográfico, seja pela manhã, seja à tarde; 2) radiação difusa com registro regular, inferior ou da ordem de 0,1 ly/min; 3) presença de nuvens só em intervalos curtos e isolados.

As cinco estações dispõem de registros actinográficos em períodos variáveis entre 1976 e 1979. Foram escolhidos 196 pares de actinogramas de radiação global e difusa, cujas freqüências por bimestre são ilustradas na Tabela 1. Os dias com céu aberto são escassos entre João Pessoa e Campina Grande (esta, a 600 metros de altitude e a 130 km da costa, na Serra da Borborema). Para ambas, junho-julho apresenta maior freqüência, ainda que em geral seus actinogramas evidenciem nuvens freqüentes pela manhã. Os locais interiores apresentam a maior freqüência em agosto-setembro (entre 10 e 15% do período). O número máximo de dias com céu aberto parece associar-se a uma situação regional dominante no Estado da Paraíba, mais do que ao regime de chuvas; segundo Serra (citado em Aragão, 1975) o trimestre mais chuvoso para João Pessoa e Campina Grande seria maio-junho-julho, ao passo que, para o interior, seria o trimestre fevereiro-março-abril.

## DISTRIBUIÇÃO ANUAL DA IRRADIAÇÃO DIÁRIA

**Irradiação no topo da atmosfera.** Sendo  $S$  o fluxo específico (ou densidade de fluxo) de radiação solar a nível da órbita terrestre, a irradiação diária  $Q_{Od}$  no topo da atmosfera, sobre um dado local, corresponde à integral sobre o período  $T$  de insolação teórica,

$$Q_{Od} = \int_T S \cos Z \, dt \quad (2)$$

$Z$  é variável durante o dia, segundo a expressão

$$\cos Z = \sin \phi \cdot \sin \delta + \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \cos h, \quad (3)$$

$2\mu$ , conseqüentemente,

onde  $\phi$  é a latitude do local,  $\delta$  a declinação do Sol (considerada constante durante um dia),  $h$  é o ângulo que a Terra deve girar para atingir o meio-dia solar local. A integral em (2) resulta (Sellers, 1965):

$$Q_{Od} = \frac{2S}{\Omega} (H \cdot \sin \phi \cdot \sin \delta + \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \sin H), \quad (4)$$

$\Omega = dh/dt$  e a velocidade angular da Terra em torno do seu eixo;  $H$  é o ângulo descrito pela Terra entre o amanhecer (teórico) e o meio-dia solar, *medido em radianos*. O valor de  $H$  é obtido da equação (3) impondo a condição  $Z = 90^\circ$ . Obviamente,  $Q_{Od}$  é obtido em ly (cal/cm<sup>2</sup>) a partir de  $S$  em ly/min e em rad/min.

A distância  $D$  Terra-Sol é variável durante o ano, enquanto que a emissão de radiação pelo Sol deve ser considerada constante, pelo menos dentro de 1% (Boischot, 1966). Assim, sendo  $\bar{S}$  o fluxo específico médio de radiação solar à distância  $\bar{D}$  Terra-Sol, à distância  $D$  ter-se-á:

$$S = \bar{S} \cdot (\bar{D}/D)^2;$$

este valor de  $S$  é o incluído na equação (4).

O valor da "constante solar"  $\bar{S}$  ainda hoje admite discussão, a maior parte das divergências provém da avaliação da componente UV Solar. As variações temporais de  $S$  seriam de ordem inferior ao erro de estimativa (2%), tendo sido publicados os valores 1,94 ly/min (Abett, 1953; Johnson,

Tabela 1 — Dias com céu aberto na Paraíba.

Local	Período	F — M	A — M	J — J	A — S	O — N	D — J
João Pessoa	fev77-dez78	02/108	03/122	09/122	05/122	02/118	01/ 62
C. Grande	ago76-dez79	01/118	03/135	03/171	04/185	04/229	04/181
Patos	jun76-jun79	01/116	03/117	15/152	18/122	10/152	05/155
Pombal	mai76-fev78	01/ 73	— / 71	10/122	12/122	11/122	03/124
Cajazeiras	mai76-out78	02/ 43	03/132	16/183	26/183	14/153	06/124

1954; Kondratyev, 1969),  $1,96 \pm 2\%$  ly/min (List, 1971) e  $2,00 \pm 2\%$  ly/min (Sellers, 1965; Boischot, 1966). Será adotado aqui um valor médio compatível com os erros de estimativa declarados,

$$\bar{S} = 1,98 \text{ ly/min} = 1380 \text{ W/m}^2.$$

A Fig. 1 (curva A) ilustra o regime anual de  $Q_{od}$  para a latitude  $7^\circ\text{S}$  (adotada para o Estado da Paraíba). Em latitudes tropicais ( $|\phi| < 23^\circ 27'$ ) o Sol passa duas vezes por ano pelo zênite local. Na Paraíba, as datas correspondentes são 2 de março e 12 de outubro aproximadamente. Os valores respectivos de  $Q_{od}$  não coincidem para ambas as datas, desde que as distâncias Terra-Sol não são iguais (List, 1971). Em termos gerais, porém, pode-se dizer que de outubro a março  $Q_{od}$  varia entre 900 e 930 ly diários, e no outro semestre,  $Q_{od}$  atinge um mínimo da ordem de 750 ly em junho.

Como já foi mencionado, os actinógrafos Fuess não detectam radiação do espectro solar completo. Considerando as irradiancias monocromáticas no topo da atmosfera, o fluxo específico para o intervalo  $\Delta$ : (0,4-2 $\mu$ ) deve valer  $\bar{S}' = 1,70$  ly/min (Kondratyev, 1969) isto é, 87% da constante solar (estimada como 1,94 ly/min). Na Fig. 3 pode-se apreciar aquela parte do espectro solar "invisível" para um actinógrafo; dos 0,25 ly/min ignorados pelo instrumento, 0,13 (6,3% de  $\bar{S}$ ) correspondem a UV com  $\lambda < 0,4\mu$ , e 0,12 (6,2% de  $\bar{S}$ ) a IV com  $\lambda > 2\mu$ . Deve-se ressaltar que, de qualquer forma, a interação da radiação solar com a atmosfera atenua enormemente a componente UV direta, de forma que à superfície ela está presente só na radiação difusa.

Dada a constante solar "efetiva"  $S'$  para um actinógrafo, à distância D Terra-Sol fica definido um fluxo específico "efetivo"  $S' = \bar{S}' (\bar{D}/D)^2 = 0,87 S$ . A irradiação "efetiva" no topo da atmosfera,  $Q'_{od}$ , é calculada segundo a eq. (4), com  $S'$  em lugar de  $S$ ; os resultados vêm ilustrados pela curva B da Fig. 1. Para estimativas de transmissividade média diária da atmosfera, baseadas em dados de actinógrafo Fuess, a curva B torna-se necessária na avaliação da irradiação no topo da atmosfera; seu intervalo espectral de validade limita-se a  $\Delta$ .

**Irradiação global à superfície ("radiação global").** A região C da Fig. 1 apresenta médias de irradiação global diária  $G_d$ , para as cinco estações consideradas. Sempre que possível, foi realizada planimetria para cada metade da passagem do Sol (do amanhecer ao meio-dia, e/ou do meio-dia ao entardecer); isto permitiu não considerar uma metade do dia com presença ostensiva de nuvens, quando era o caso. Comprovou-se que as nuvens isoladas (em intervalos curtos) afetam a planimetria na ordem de 1% ou menos, quando se compara com o resultado da interpolação do registro actinográfico, no intervalo de passagem da nuvem.

Com base nas estimativas de irradiação durante metades de dia, tiraram-se as médias respectivas por mês e por lo-

cal. A irradiação média diária  $\bar{G}_d$  foi avaliada em duas vezes essas médias.

Os resultados exibem o ciclo anual esperado; dentre as cinco estações, Cajazeiras apresenta a máxima irradiação global diária. A Fig. 1 (C) sugere a seqüência decrescente Cajazeiras-Pombal-Patos-Campina Grande, ainda que esta tenha um comportamento flutuante, perto dos níveis de Patos e Pombal. A amplitude das diferenças entre as estações do interior não excede 40 ly diários.

**Irradiação difusa à superfície ("radiação difusa").** As médias de irradiação difusa diária,  $\bar{q}_d$ , são mostradas na Fig. 1 (região E); observa-se que  $\bar{q}_d$  em geral acompanha as variações da irradiação no topo da atmosfera, com máximo de uns 80 ly entre setembro e março, e mínimo de 25-30 ly em junho. Pombal e Campina Grande apresentam a maior radiação difusa do conjunto. Em termos gerais, para as estações do interior  $\bar{G}_d$  contém entre 7% de radiação difusa em junho-julho e 11% em março.

**Irradiação direta à superfície ("radiação direta").** Foram deduzidos os valores  $Q_d = G_d - q_d$  para cada par de actinogramas analisado. A Fig. 1 (região D) apresenta os valores médios  $\bar{Q}_d$  ao longo do ano: para Patos, Pombal e Cajazeiras observa-se um comportamento semelhante, ainda que Cajazeiras apresente os máximos valores do conjunto. Exceto em junho-agosto,  $\bar{Q}_d$  é maior para Patos que para Pombal.

Em termos gerais, as estações do interior exibem uma transmissividade média de 70% em março, que aumenta para 78% em junho-julho e cai para 76% em outubro-novembro. É interessante notar que o máximo da transmissividade média aparece durante o período seco do interior.

## O FLUXO DIRECIONAL À SUPERFÍCIE

A Fig. 2 apresenta o fluxo direcional médio para quatro épocas do ano, em função do ângulo zenital Z. Os valores de  $\Phi$  foram calculados segundo as eqs. (1) e (3), a partir do registro instantâneo de pares de actinogramas. Em cada gráfico incluiu-se o valor da constante solar "efetiva"  $S'$ , assim como a função  $\Phi_R(Z)$ . Esta última representa o fluxo direcional que seria observado à superfície, após atravessar uma atmosfera seca e limpa (Kondratyev, 1969) ou seja após sofrer atenuação por dispersão Rayleigh.

Como era de se esperar, os valores de  $\Phi(Z)$  são menores do que  $\Phi_R(Z)$ , evidenciando a presença de outros fenômenos de absorção-dispersão, que poderiam ser: 1) dispersão por aerossóis; 2) absorção por vapor d'água atmosférico; 3) eventual albedo de nuvens tênues e altas, não evidenciadas pelos actinogramas.

O erro intrínseco associado às determinações de  $\Phi$  (além da calibragem do instrumento e da precisão do fator de correção sazonal) é da ordem de 0,05 ly/min. As medidas sugerem que nos meses de setembro e outubro a atmosfera apresenta essencialmente o mesmo comportamento entre Campina Grande e Cajazeiras, com uma trans-

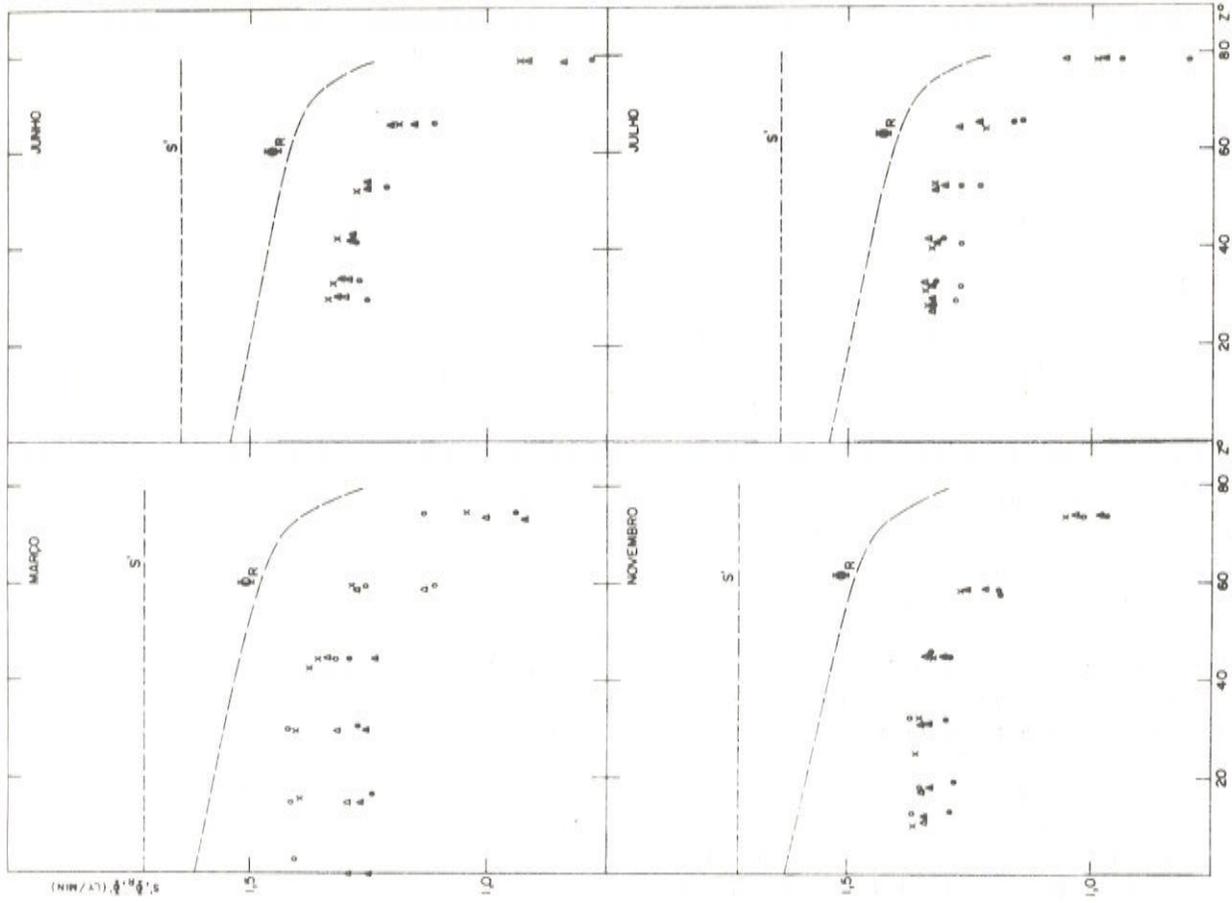


Figura 2 — Fluxo específico com céu claro na Paraíba, em função do ângulo zenital Z do Sol.

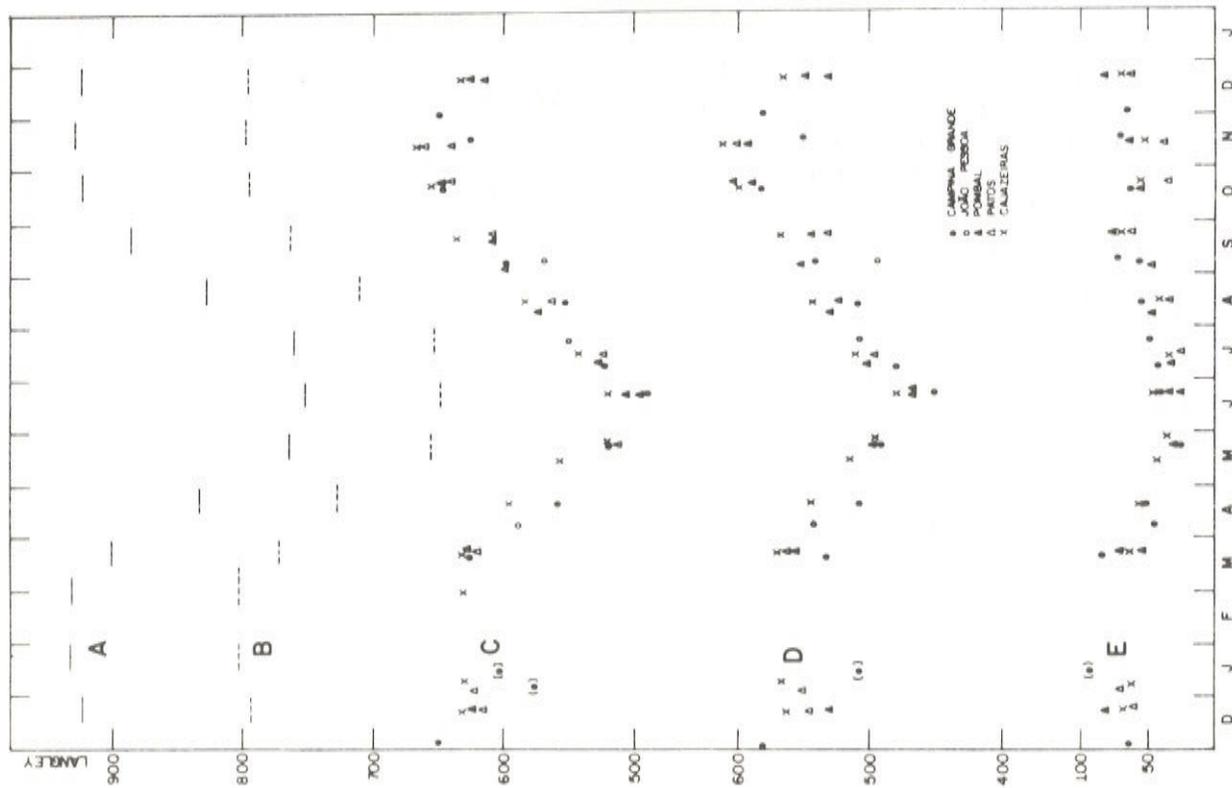


Figura 1 — Irradiação diária na Paraíba: no topo da atmosfera ( $Q_{0d}$ ) e detectável por actinômetro ( $Q_{0d}$ ); global ( $G_{0d}$ ), direta ( $Q_{0d}$ ) e difusa ( $q_{0d}$ ) detectadas à superfície.

missividade constante de 76% entre o zênite e  $Z=50^\circ$  (aprox. entre às 9:00 e 12:00, ou 12:00 e 15:00 hora solar). Algo semelhante é observado em julho, com transmissividade de 80%. João Pessoa tende a apresentar valores de  $\Phi$  menores do que as outras estações, enquanto Cajazeiras é a única com comportamento sistemático (com os valores máximo de  $\Phi$  em quase todo o ano).

Em termos gerais, pode-se dizer que entre  $Z = 0^\circ$  e  $45^\circ$  a transmissividade atmosférica é constante o ano todo, oscilando entre 72% e 82% segundo o local e o mês considerado. As máximas apresentam-se em Cajazeiras, particularmente em março e agosto. Para  $Z = 60^\circ$ , a transmissividade oscila entre 70 e 73%; para  $Z = 80^\circ$  as medidas não oferecem confiança suficiente, mas pode-se supor um valor em torno de 60%.

### ÁGUA PRECIPITÁVEL E AEROSOL ATMOSFÉRICO

A determinação de  $\Phi$  a partir de registros actinográficos permite uma primeira estimativa da água precipitável na atmosfera ou, pelo menos, seu valor máximo possível.

O fluxo monocromático no topo da atmosfera,  $S_\lambda$  é uma função do comprimento de onda (Fig. 3). Para um intervalo  $d\lambda$  de amplitude pequena, segundo a lei de Lambert-Beer deve-se receber à superfície um fluxo correspondente (direcional)  $d\Phi = \Phi_\lambda d\lambda$  tal que

$$\Phi_\lambda d\lambda = S_\lambda e^{-m\tau_\lambda} d\lambda = S_\lambda p_\lambda^m d\lambda, \quad (5)$$

onde  $\tau_\lambda$  e  $p_\lambda$  são a espessura ótica e transmissividade verticais apresentadas pela atmosfera para  $\lambda$ ;  $m$  denomina-se "massa atmosférica", e para fins meteorológicos é virtualmente igual a  $\sec Z$  e independe de  $\lambda$  (Kondratyev, 1969), exceto para raios solares quase horizontais ( $Z \approx 90^\circ$ ).

A atenuação de radiação entre o topo da atmosfera e a altitude  $z$ , provém dos efeitos de absorção ( $A$ ) e dispersão (*scattering*) ( $S$ ), seja por gases ( $g$ ) ou aerossóis ( $a$ ) atmosféricos. Sendo

$$\tau_\lambda = \int_0^\infty \alpha_\lambda dz = \int_0^\infty \rho(z) x_\lambda dz,$$

onde  $\alpha_\lambda$  = coeficiente de atenuação,  $x_\lambda$  = coeficiente de massa (*mass coefficient*) de atenuação e  $\rho(z)$  a densidade da atmosfera à altitude  $z$ , os quatro efeitos possíveis podem ser separados, de forma que

$$\tau_\lambda = \tau_{\lambda, Ag} + \tau_{\lambda, Aa} + \tau_{\lambda, Sg} + \tau_{\lambda, Sa} \quad (6)$$

Na eq. (6) cada parcela tem as seguintes características específicas de influência no espectro de radiação solar (King e Buckius, 1979):

( $Ag$ ). A absorção por gases atmosféricos que não  $H_2O$  e  $CO_2$ , concentra-se na região UV  $< 0,3\mu$ , e na IV  $> 4\mu$ . Observa-se absorção muito leve no visível ( $\lambda \sim 0,6$ ), bandas de Chappuis), causada pelo  $O_3$ . No intervalo IV: ( $0,75 - 2\mu$ ) o principal absorvente de radiação é o vapor d'água; o oxigênio apresenta absorção fraca.

( $Aa$ ). O aerossol atmosférico representa uma massa muito pequena em relação ao ar, e não merece ser considerado em termos de absorção.

( $Sg$ ). A dispersão por gases atmosféricos é do tipo Rayleigh. A espessura ótica vertical é proporcional à massa atravessada por unidade de área e aproximadamente proporcional a  $\lambda^{-4}$  (Johnson, 1954). Nessas condições, os gases com efeito dispersivo predominante são  $N_2$ ,  $O_2$ , e não  $CO_2$  ou  $H_2O$ .

( $Sa$ ). O aerossol atmosférico apresenta partículas com tamanhos comparáveis ou maiores do que os comprimentos de onda no espectro solar (nesta categoria, poderiam ser incluídas gotículas de água com relação à radiação IV). O tipo de dispersão produzido é descrito como efeito Mie, de formulação matemática complexa. O efeito de dispersão pelo aerossol atmosférico pode ser ainda maior do que o de dispersão Rayleigh.

Tendo em conta o intervalo  $\Delta$  de sensibilidade de um actinógrafo, o fluxo direcional detectável à superfície vale

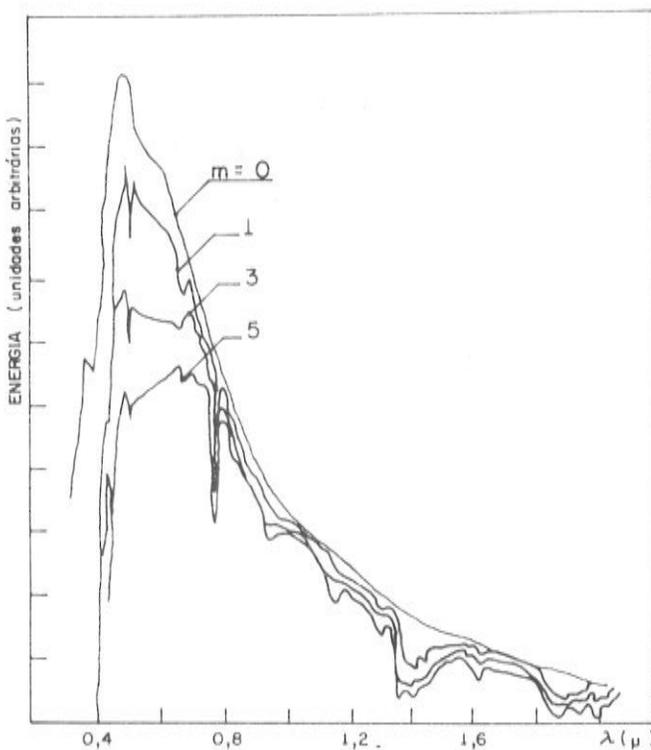


Figura 3 — Espectro de radiação solar com céu claro para várias massas atmosféricas;  $w = 0,05 \text{ g/cm}^2$  Kondratyev, 1969).

$$\Phi'(m) = \int_{0,4\mu}^{2\mu} S_{\lambda} e^{-m\tau_{\lambda}} d\lambda \quad (7)$$

As dispersões Rayleigh e Mie verificam-se em todo o intervalo  $\Delta$ , ainda que mais intensamente para  $\lambda$  menores. A absorção pode ser ignorada no visível ( $0,4 - 0,76\mu$ ), enquanto que, no IV próximo, o vapor d'água presente na atmosfera possui bandas de absorção importantes. Sendo  $\delta_i$  ( $i = 1, 2, \dots$ ) os intervalos de  $\lambda$  onde tais bandas se manifestam, a eq. (7) pode ser escrita

$$\begin{aligned} \Phi'(m) = & \int_{\Delta} S_{\lambda} \cdot e^{-m\tau_{\lambda}} S d\lambda + \\ & + \sum_i \left( \int_{\delta_i} S_{\lambda} e^{-m(\tau_{\lambda, S} + \tau_{\lambda, A})} d\lambda - \right. \\ & \left. - \int_{\delta_i} S_{\lambda} e^{-m\tau_{\lambda}} S d\lambda \right), \end{aligned}$$

ou, considerando valores médios de  $e^{-\tau_{\lambda, A}} = p_{\lambda, A}$  e de  $S_{\lambda} e^{-\tau_{\lambda}} S g = \Phi_{\lambda, R}$  nos intervalos  $\delta_i$ , sejam  $p_{i, A}$  e  $\Phi_{i, R}$ , tem-se que

$$\begin{aligned} \Phi'(m) = & \int_{\Delta} \Phi_{\lambda, R} e^{-\tau_{\lambda, Sa} \cdot m} d\lambda - \\ & - \sum_i (1 - p_{i, A}^m) \Phi_{i, R} \cdot e^{-m\tau_{i, Sa}} \quad (8) \end{aligned}$$

Nesta equação, observa-se que a presença de aerossóis influi tanto na atenuação por dispersão quanto na absorção de radiação pelo vapor d'água. A presença de nuvens tênues que possam introduzir um efeito adicional de atenuação por albedo não é considerada. No que segue, supõe-se que esse efeito não existe, e tampouco a dispersão múltipla.

Para a espessura ótica devida a aerossóis, tem sido proposta a expressão

$$\tau_{\lambda, Sa} = \beta \lambda^{-b} \quad (\lambda \text{ em microns}), \quad (9)$$

onde  $\beta$  (fator de turbidez) e  $b$  dependem da distribuição vertical de aerossóis. Para o valor de  $b$ , Ångström (1964) propõe uma estimativa de referência 1,3. Todavia, têm sido citados valores entre 0,5 e 2 (McCartney e Unsworth, 1979). Para visibilidade entre 5 e 23 km,  $\beta$  teria valores 0,48 e 0,14 respectivamente (King e Buckius, 1979). A função  $p_{\lambda, Sa} = e^{-\tau_{\lambda, Sa}}$  é lentamente variável em  $\Delta$ , de forma que a eq. (8) pode ser escrita

$$\Phi'(m) = p_{Sa}^m \cdot (\Phi_R - \Delta S_0), \quad (10)$$

onde  $p_{Sa}$  é um valor médio apropriado, e  $\Delta S_0$  refere-se à atenuação produzida nas bandas de absorção de  $H_2O$  (dispersão Rayleigh mais absorção;  $\beta = 0$ ). Adotado um valor de  $b$ , a eq. (10) permite calcular um limite máximo para  $\beta$ , desde que  $p_{Sa}^m \geq \Phi'(m)/\Phi_R$  (m).

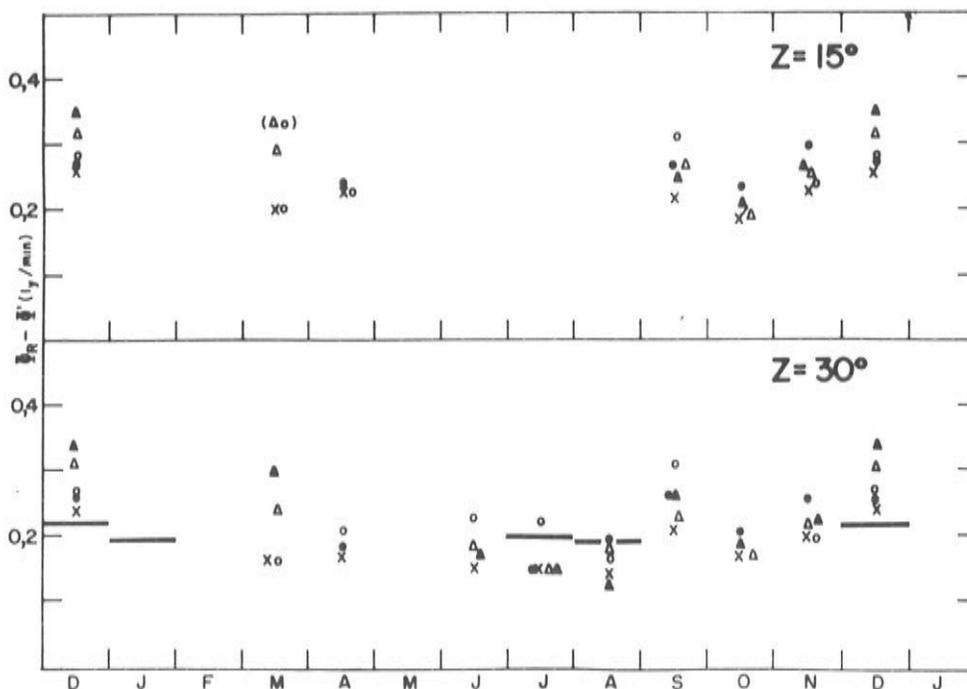


Figura 4 — Diferença entre fluxo esperado por dispersão Rayleigh ( $\Phi_R$ ) e fluxo medido ( $\Phi'$ ). (==) representa absorção  $\Delta S_0$  estimada para Petrolina (Pe).

A Fig. 4 apresenta as diferenças  $\Phi_R - \Phi'$  para céu aberto, ao longo do ano e para  $Z = 15^\circ$  e  $Z = 30^\circ$ . Por causa do erro intrínseco ao método de medida, diferenças de 0,05 ly/min entre estações não são significativas. Todavia, Cajazeiras exibe claramente os valores mínimos; pode-se ainda dizer que em junho-julho-agosto as três estações do sertão têm o mesmo comportamento (um mínimo de  $\Phi_R - \Phi'$ ). Entre abril e julho, João Pessoa teria os valores máximos, e Pombal, entre dezembro e maio. Porém, não há evidência conclusiva de que estas diferenças máximas tenham relação estreita com a época de chuvas, desde que entre novembro e maio muitas das estações apresentam os mesmos valores de  $\Phi_R - \Phi'$  (sem corresponderem às respectivas épocas de chuvas). Adicionalmente, setembro apresenta um evidente máximo relativo para todos os locais.

Os valores de  $\Psi_R - \Phi'$  na Fig. 4 vêm influenciados tanto pela presença de aerossol como de vapor d'água atmosféricos. Se for suposta uma atmosfera sem aerossóis ( $p_{Sa} = 1$ ), da eq. (10) obter-se-ia para Cajazeiras  $\Delta S_o = 0,15$  ly/min (julho-agosto) e 0,24 ly/min (dezembro), máxima absorção possível por vapor d'água nessas épocas. Segundo resultados de MacDonald (Kondratyev, 1969) a água precipitável correspondente (*máxima possível*) seria 0,9 e 4 g/cm<sup>2</sup>, respectivamente. É interessante ressaltar que junho-julho é representativo do período seco, e dezembro do início das chuvas em Cajazeiras.

Por outro lado, supondo  $b = 1,3$ , para  $Z = 30^\circ$  a Fig. 2 indica que para Cajazeiras é  $p_{Sa}^m \leq \Phi'/\Phi_R \cong 0,90$  ( $\beta \leq 0,10$ ) em abril-agosto, e em torno de 0,87 ( $\beta \leq 0,15$ ) em setembro-dezembro. Ambos resultados indicam um nível baixo de turbidez, e provável escassez relativa de aerossol.

A fim de evidenciar possíveis comportamentos regionais da água precipitável, processaram-se dados de radiossondagem para Petrolina (PE), no alto sertão, distante 500 km do Atlântico e uns 300 km a Sudeste de Patos-Cajazeiras. Foram considerados alguns dias dentre os de céu aberto na Paraíba, obtendo-se  $w = 2,42 \pm 0,37$  g/cm<sup>2</sup> (julho-agosto de 1976) e  $3,14 \pm 0,60$  g/cm<sup>2</sup> (dezembro 1976/77/78). Os valores correspondentes de  $\Delta S_o$  (0,19 e 0,21 ly/min) estão ilustrados na Fig. 4; observa-se que excedem  $\Phi_R - \Phi'$  em julho-agosto e são próximos ou inferiores a  $\Phi_R - \Phi'$  em dezembro. Considerando os possíveis erros de medida, com relação a Cajazeiras, tem-se  $p_{Sa} \sim 1$  em ambos os casos. Contudo, o fato de ser  $\Phi_R - \Phi' < 0,19$  em julho para todas as estações do interior sugere que a água precipitável sobre Petrolina não é representativa da encontrada na Paraíba.

## SÍNTESE E CONCLUSÕES

Dentro do intervalo sensível  $\Delta: (0,4 - 2\mu)$  de um actinógrafo Fuess, as estações da rede solarimétrica da Universidade Federal da Paraíba permitem determinar  $G_d$ ,  $q_d$  e  $Q_d$ . Analisaram-se situações de céu aberto, para as quais a irra-

dição diária pode ser estimada dentro de 1%, foi encontrado um ciclo anual semelhante ao longo de 450 km, desde o litoral (João Pessoa) até o alto sertão (Cajazeiras). Registra-se uma transmissividade da ordem de 79-82% para a irradiação global diária, e 73% para a irradiação direta diária, durante o ano todo. Seguindo o ciclo anual de  $Q_{od}$ , a irradiação direta tem um mínimo de 470-480 ly diários em junho e dois máximos, em torno de 560 ly diários em janeiro-março e 600-620 ly em novembro. Comparada com a energia incidente no topo da atmosfera, a irradiação difusa diária está entre 4% (junho) e 10% (setembro-março). João Pessoa, Campina Grande, e Pombal tendem a apresentar os valores máximos de radiação difusa, e Patos os menores.

As determinações de  $\Phi'$  (fluxo direcional) indicam uma transmissividade atmosférica constante até ângulos zenitais não menores do que  $45^\circ$ , da ordem de 72 a 80%. As três estações interioranas (Patos, Pombal e Cajazeiras) têm comportamento semelhante, com transmissividade em geral maior do que a observada para João Pessoa e Campina Grande (esta, a 130 km do litoral). Para o Sol perto do zênite,  $\Phi'$  atinge 1,32-1,37 ly/min em Cajazeiras (que apresenta em geral, os valores máximos dentre as cinco estações).

Os dias com céu aberto são mais escassos em João Pessoa e Campina Grande (2% do ano) do que nas estações interioranas (7%); apresentam-se com maior frequência em junho-julho no litoral (7%) e em agosto-setembro no interior (13%), sugerindo uma influência de situações sinóticas em escala regional (talvez no Nordeste), mais do que das épocas locais de chuva.

A medição de  $\Phi'$  (m) permite ao menos estabelecer limites superiores para a água precipitável na atmosfera. Em Cajazeiras, ter-se-ia *como máximo* 0,9 g/cm<sup>2</sup> em julho-agosto (época seca) e 4 g/cm<sup>2</sup> em dezembro (início da época chuvosa). Já no caso de João Pessoa, para ambas as épocas verificam-se valores em torno de 4 g/cm<sup>2</sup>. A época com maior frequência local de dias com céu aberto não apresenta relação definida com a água precipitável, desde que, para todas as estações, verificou-se um máximo de  $\Phi_R - \Phi'$  em setembro.

A turbidez atmosférica em ausência de nuvens teria valores reduzidos ( $p_{Sa} \geq 0,86$ ;  $\beta \leq 0,15$ , em casos extremos). A partir deste limite para a turbidez e dos valores de  $\Phi_R - \Phi'$ , não há evidência de que o interior da Paraíba tenha o mesmo regime de água precipitável que Petrolina, no alto sertão pernambucano, pelo menos no bimestre julho-agosto.

Concluindo, as medições para dias de céu claro proporcionam uma base de partida para a análise das interações radiação solar-atmosfera em condições mais complexas. Num primeira aproximação, é possível avaliar limites superiores de turbidez e água precipitável. Os erros de determinações isoladas de fluxos de radiação (não menores do que 0,05 ly/min) podem induzir uma imprecisão na avaliação de  $w$  de, por exemplo, 1 g/cm<sup>2</sup>. Contudo, uma análise estatística adequada permite definir comportamentos típicos de um dado local. É importante ressaltar que a presença de

nuvens tênues e estendidas (dificilmente separável a partir de dados actinográficos) influi nas estimativas de atenuação por aerossóis e vapor d'água atmosféricos. Provavelmente, fotografias de satélite poderiam ajudar a separar seu efeito de albedo.

A utilização de filtros adequados (Sadler, 1978) permitiria avaliar o fator de turbidez com maior precisão, e como conseqüência obter estimativas melhores de água precipitável. Alternativamente, dispondo-se de dados de radiosondagem para o local analisado, parece claro que se pode obter uma avaliação razoável do fator de turbidez e seu regime anual.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Setor de Solarimetria do NMA-UFPb pela colaboração em planimetria de actinogramas; também, ao Departamento de Recursos Naturais da SUDENE pela cessão de dados aerológicos para determinação de água precipitável em Petrolina. Ainda, os membros do NMA por discussões e idéias úteis para este trabalho.

## REFERÊNCIAS

- ABETTI, G. — 1953 — El Sol. EUDEBA (Ed. Universitária de Buenos Aires).
- Ångström, A. — 1964 — The parameters of atmospheric turbidity. *Tellus XVI*: 64-75.
- ARAGÃO, J. O. ROCHA DE — 1975 — Um estudo da estrutura das perturbações sinóticas do Nordeste do Brasil. INPE-789-TPT/017.
- BOISCHOT, A. — 1966 — Le Soleil et la Terre. Presses Universitaires de France, Paris.
- FÜESS BERLIN-STEGLITZ — 1962 — Bimetallic Actinograph — Robitzsch Fuess Type. Berlin, pub. 251, 1 E.
- JOHNSON, J.E. — 1954 — Physical Meteorology. J. Wiley & Sons.
- KING, R. e BUCKIUS, R.O. — 1979 — Direct solar transmittance for a clear sky. *Solar Energy* 22: 297-301.
- KONDRATYEV, Y. — 1969 — Radiation in the atmosphere, cap. 5. Acad. Press.
- LIST, R.J. — 1971 — Smithsonian Meteorology Tables. Smithsonian Institution, Washington.
- McCARTENEY, H.A. e UNSWORTH, M.H. — 1978 — Spectral distribution of solar radiation. I: direct radiation. *Quart. J. Royal Met. Soc.* 104: 699-718.
- NMA (NÚCLEO DE METEOROLOGIA APLICADA — UNIVERSIDADE FED. DA PARAÍBA) — 1981 — Zoneamento do Potencial de Energia Solar do Nordeste. Convênio CNPq — SUDENE/UFPb-NMA — Coleção Politécnica, série PT nº 2 (UFPb).
- SÁ, D. FINIZOLA DE — 1977 — Radiação solar e sua importância no aproveitamento agrícola de encostas no Nordeste do Brasil. INPE-1005-TPT/049.
- SADLER, G. W. — 1978 — Characteristics of clear sky normal incidence solar insolation measured with RG2 filter. *Solar Energy* 20: 139-142.
- SELLERS, W.D. — 1965 — Physical Climatology. The Univ. of Chicago Press.
- SEPLANTEC/IV DISME — 1979 — Potencial solar do Estado da Bahia. Governo da Bahia, Sec. de Planejamento, Ciência e Tecnologia/Instituto Nac. de Meteorologia, 4º Distrito.

Versão original recebida em Jan/1981;

Versão final, em Mai/1983.