

A Variação Sazonal da Radiação Ultravioleta Solar Biologicamente Ativa

V. W. J. H. Kirchhoff ¹, E. Echer ², N. P. Leme ³ & A. A. Silva ⁴

Séries temporais de radiação UV-B, biologicamente ativa, obtidas em vários locais no Brasil, em Punta Arenas no Chile e em La Paz na Bolívia são apresentadas. O quadro atual de mudança atmosférica, principalmente a tendência global de redução no ozônio total, fez surgir na comunidade científica preocupações quanto a um possível aumento na intensidade da radiação ultravioleta (UV) solar na superfície terrestre. Nesse contexto, o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais-INPE opera uma rede de medidores do tipo Biômetro, radiômetros especialmente projetados para medir a radiação UV causadora de efeitos danosos à saúde humana, a radiação UV-B Eritema, desde o início dos anos 1990. Analisam-se neste trabalho as séries temporais de máxima dose diária de radiação UV-B Eritema obtidas com o Biômetro, estudando-se a variação sazonal e calculando-se o Índice UV. Os maiores valores do Índice UV são encontrados nas regiões de La Paz, Campo Grande e Natal. A radiação UV-B apresentou uma forte dependência da latitude geográfica e da altitude, conforme esperado. Os Índices UV atingiram valores próximos a 15 em La Paz, e acima de 12 em Natal e Campo Grande no período de verão. Também é apresentado o resultado de um experimento para medir a radiação UV-B difusa realizado em Cachoeira Paulista em 24 e 25 de novembro de 1998. A radiação difusa representa pelo menos 45% da radiação global para o UV-B Eritema.

Palavras-chave: Radiação ultravioleta solar; UV-B; Atmosfera; Eritema; Biômetro.

THE SEASONAL VARIATION OF BIOLOGICALLY ACTIVE SOLAR UV-B RADIATION-Time series of biologically active UV-B radiation observed at sites in Brazil, and at La Paz, Bolívia and Punta Arenas, Chile, are presented. With the ozone depletion occurring in the earth's atmosphere, increases of UV-B radiation are expected. Since 1991, the National Institute for Space Research- INPE, has been acquiring data on biologically active solar UV radiation (Erythemal UV), at ground level. A network of radiometers to measure UV-B radiation has been used. The seasonal variations and an average UV-Index calculation is presented. The regions of La Paz, Campo Grande and Natal have the higher UV-B intensities. The UV-B radiation presented a dependency with geographical latitude and altitude, as expected. The UV-Index for summer was close to 15 at La Paz and above 12 for Campo Grande and Natal. The experiment to measure UV-B diffuse radiation showed that diffuse radiation is at least 45% of global radiation in the Erythemal UV-B radiation range.

Key words: Solar ultraviolet radiation; UV-B; Atmosphere; Erythema; UV-Biometer

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, São José dos Campos, S. P., Brasil.
Caixa Postal 515, CEP: 12201-970

^{1,2,4}Fone: (012) 345 - 6037 ³Fone: (012) 345 6047

^{1,2,4}Fax: (012) 322 - 9887 ³Fax: (012) 345 6010

e-mail: kir@sir.inpe.br

e-mail: ezequiel@dge.inpe.br, nleme@dge.inpe.br, abel@dge.inpe.br

INTRODUÇÃO

Com as observações realizadas nas últimas duas décadas, sobre a tendência global de redução do ozônio atmosférico e o fenômeno do buraco de ozônio antártico (Farman et al., 1985; Solomon et al., 1986) surgiu uma preocupação na comunidade científica quanto à possibilidade de haver um aumento na intensidade de radiação ultravioleta (UV) solar na superfície terrestre. Há evidências também de que efeitos do buraco de ozônio podem propagar-se à latitudes mais baixas e densamente povoadas (Kirchhoff et al., 1996). Conseqüentemente o interesse por medidas de radiação UV solar vem crescendo e muitas observações tem sido feitas nas comunidades possivelmente mais afetadas (Kirchhoff et al., 1997a, 1997b, 1997c).

A análise de dados de satélites e de medidores de superfície mostra uma tendência de decréscimo do ozônio total em nível global. Bojkov et al. (1995) analisaram os dados de 46 estações utilizando o espectrofotômetro Dobson, para o período 1964–1994, e encontraram tendências de declínio no conteúdo de ozônio em latitudes médias (35° – 60°) de $-4,3\%$ /década e $-4,1\%$ /década para os hemisférios Norte e Sul, respectivamente, desde janeiro de 1979. Dados do instrumento TOMS (*Total Ozone Mapping Spectrometer*) apresentam tendências de decréscimo na década de 80 para a faixa latitudinal de 45° N e 45° S, de -3% /década para o Hemisfério Norte e $-4,3\%$ /década para o Hemisfério Sul (Frederick & Lubin, 1994). O ozônio absorve fortemente na faixa espectral do UV-B solar e uma redução significativa no ozônio total pode acarretar um aumento apreciável no fluxo UV-B solar na superfície terrestre. Estima-se que uma redução de 1% no ozônio total poderia causar um aumento de 1,2% na radiação UV biologicamente ativa (Krzýscin, 1996).

A medida de radiação UV solar na superfície terrestre é difícil devido à sua pequena intensidade, a rápida variação da intensidade espectral com o comprimento de onda e à escassez de radiômetros calibrados e sensíveis apenas ao UV solar operando por longo período (Sasaki et al., 1993; Weatherhead et al., 1997). Além disso, a incerteza na estabilidade dos detectores padrão e nos métodos de calibração tornam difícil a manutenção da precisão a longo prazo (Kerr & McElroy, 1993; Weatherhead et al., 1997). Por isso, a detecção de uma tendência de longo período na intensidade da radiação UV na superfície terrestre é mais difícil do que a detecção da redução do ozônio atmosférico. Além das dificuldades instrumentais, também deve-se considerar o fato da radiação solar na superfície terrestre ser função de muitas variáveis, como

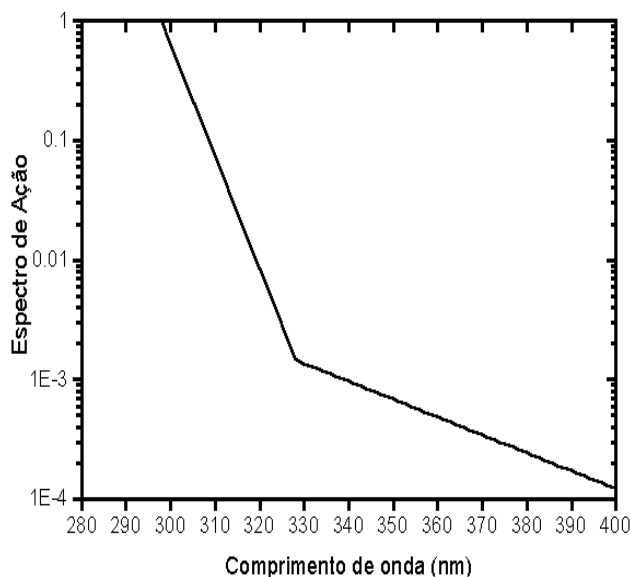


Figura 1 – Espectro de Ação de Eritema de McKinlay – Diffey.

Figure 1 – Erythral Action Spectrum from McKinlay & Diffey(1987).

por exemplo o ângulo solar zenital (*solar zenith angle* – “ θ ”), altitude em relação ao nível do mar, o ozônio total, a coluna atmosférica de aerossóis, a nebulosidade, o albedo superficial, entre outros fatores (Lenoble, 1993; Krzýscin, 1996). Portanto, para a detecção de uma tendência a longo prazo na radiação UV associada à redução no ozônio atmosférico, são necessárias observações de longo prazo e um estudo comportamental da radiação UV e suas variações em função das diversas variáveis das quais ela é dependente.

Para monitorar a radiação ultravioleta solar na superfície terrestre, em especial a radiação biologicamente ativa (UV-B, 280–320 nm), o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais-INPE, mantém uma rede de medidores de UV que consiste de sensores dos tipos Radiômetro UV de Superfície (GUV), espectrofotômetros Brewer (Kirchhoff et al., 1993) e Biômetros (Echer et al., 1999). No presente trabalho descreveremos a rede de medidores Biômetro, os quais medem a radiação biologicamente ativa UV-B Eritema, e uma análise dos resultados obtidos para as várias estações de observação.

SENSIBILIDADE BIOLÓGICA DA RADIAÇÃO UV-B

A irradiância solar espectral na superfície terrestre é medida em termos de potência por área e por comprimento de onda, em unidades, W^2nm^{-1} , ou em banda integrada em Wm^{-2} . Para o estudo de efeitos

Intervalo Índice - UV	Classificação
0-2	Mínimo
3-4	Baixo
5-6	Moderado
7-9	Alto
>10	Muito alto

Tabela 1 – Classificação dos Índices UV.

Table 1– UV – Index Classification.

biológicos utilizam-se fatores de ponderação, os quais atribuem pesos maiores a comprimentos de onda de maior interação biológica. A sensibilidade biológica nos diferentes comprimentos de onda é descrita por um espectro de ação. Um espectro de ação é definido como uma relação numérica de resposta biológica relativa sob exposição, a uma série de radiações monocromáticas em uma determinada faixa espectral (Madronich, 1993). O espectro de ação é determinado através de experimentos médicos que analisam o efeito biológico de diferentes comprimentos de onda de radiação. Realizando-se a convolução entre a irradiância absoluta e o espectro de ação obtém-se a irradiância ponderada. Para o efeito da radiação solar sobre a pele humana, que pode provocar queimaduras e até câncer de pele, utiliza-se o espectro de ação de eritema de McKinlay & Diffey (1987), apresentado na Fig. 1. A radiação ponderada pelo espectro de ação de McKinlay-Diffey é denominada neste trabalho de radiação UV-B Eritema, medida em MED, unidade definida a seguir. O espectro de ação de eritema de McKinlay-Diffey vale para qualquer tipo de pele humana. Os diferentes fototipos humanos terão uma

diferença quanto à energia mínima e o tempo necessário para o surgimento do eritema (Kirchhoff, 1995). Alguns instrumentos, como o caso do Biômetro, já medem e ponderam a radiação pelo espectro de McKinlay-Diffey. É possível também utilizar espectros UV obtidos por espectroradiômetros, como por exemplo o espectrofotômetro Brewer, e realizar a convolução com o espectro de ação para obter a radiação biologicamente ativa.

Seja $E(\lambda)$ um espectro UV na superfície terrestre e $S(\lambda)$ um espectro de ação para um efeito biológico particular; $S(\lambda)$ é um conjunto de valores discretos e com um peso atribuído, em geral normalizado entre zero e um, para cada comprimento de onda conforme sua eficiência biológica; a intensidade espectral ponderada é definida por $E(\lambda)S(\lambda)$. Integrando-se o produto $E(\lambda)S(\lambda)$ sobre todos os comprimentos de onda obtém-se a dose instantânea e integrando sobre um período de tempo a dose instantânea obtém-se a dose de radiação, em unidades de energia biologicamente ativa e ponderada, por área. Esta energia representa-se por J^* (*Joule estrela*) para enfatizar que não é uma medida de energia pura e sim ponderada para um determinado efeito biológico. Representa-se então a dose de radiação pelas unidades $[J^*/m^2]$. A expressão a seguir representa matematicamente o conceito de dose de radiação:

$$Dose = \iint E(\lambda) S(\lambda) d\lambda dt \quad (1)$$

Uma definição muito importante é a dose mínima, que uma vez aplicada no paciente, produz após um período de 24 horas sinais de queimadura na pele-situação eritematosa. Surge então a definição do “MED”, *Minimum Erythema Dosis*, que é a quantidade

Estações de observação	Latitude S	Longitude W
Natal, RN	5,84°	35,21°
La Paz, Bolívia	16,54°	68,06°
Campo Grande, MS	19,25°	54,34°
Ribeirão Preto*, SP	21,17°	47,7°
Cachoeira Paulista, SP	22,7°	45,0°
Blumenau*, SC	26,92°	49,05°
Porto Alegre, RS	30,47°	50,38°
Punta Arenas*, Chile	53,2°	70,9°

Tabela 2 – Localização geográfica das estações de observações e período de dados analisado.

Table 2 – Geographical coordinates and data period for observational sites.

de energia mínima capaz de causar um eritema, e equivale a $23 \text{ mJ} \cdot \text{cm}^{-2}$, esta definição sendo válida para o fototipo de pele humana mais sensível à radiação solar (Kirchhoff, 1995; Krzýscin, 1996).

A partir da dose de radiação obtida pelos instrumentos ponderados com o espectro de ação de eritema de McKinlay-Diffey (Fig. 1), é calculado um outro parâmetro, o Índice Ultravioleta, I-UV ou *UV Index*, o qual foi criado para informar ao público leigo a intensidade da exposição à radiação ultravioleta solar. A definição do Índice Ultravioleta surgiu da constatação de que a energia acumulada em uma hora de exposição, quando exposta em centijoules por centímetro quadrado, varia aproximadamente entre zero e quinze. A divulgação do I-UV é apresentado numa escala adimensional e de números inteiros. O cálculo, realizado a partir da medida da dose acumulada em 1 hora, baseia-se na conversão do valor obtido em MEDs para $\text{mJ} \cdot \text{cm}^{-2}$ através da multiplicação pelo fator de conversão do instrumento (Kirchhoff, 1995). Como exemplo, tendo sido obtida uma dose de radiação em 1 hora igual a 4 MEDs, multiplicando-se pelo fator de calibração - $23 \text{ mJ} \cdot \text{cm}^{-2}$, obtém-se $92 \text{ mJ} \cdot \text{cm}^{-2}$, ou $9,2 \text{ cJ} \cdot \text{cm}^{-2}$, e o Índice UV neste caso seria igual a 9.

A Tab. 1 apresenta a classificação do Índice UV em intervalos e o correspondente conceito associado. O valor do Índice UV é um indicativo da intensidade da radiação ultravioleta.

O INSTRUMENTO DE MEDIDA BIÔMETRO

A rede de medidores UV de superfície tipo Biômetro (*UV-Biometer*), operada pelo INPE, usa atualmente (agosto/1999) detectores nas estações de observações de Porto Alegre, Cachoeira Paulista, Campo Grande e Natal no Brasil; La Paz na Bolívia e na Estação Brasileira Comandante Ferraz na Antártica. A Tab. 2 apresenta as coordenadas geográficas e o respectivo período de dados. Os detectores assinalados por “*” não se encontram mais em operação. São os Biômetros de Ribeirão Preto, Blumenau e Punta Arenas, os quais estiveram em operação até 25/10/1995, 22/01/1997 e 30/11/1997, respectivamente.

O Biômetro foi desenvolvido como uma nova geração do instrumento Robertson-Berger, medidor da intensidade da radiação UV biologicamente ativa para a pele humana utilizado desde a década de 1970 (Scotto et al., 1988; Weatherhead et al., 1997). Este instrumento foi utilizado com sucesso para correlacionar a ocorrência de câncer de pele em diferentes locais com a radiação UV (Weatherhead et al., 1997), entretanto

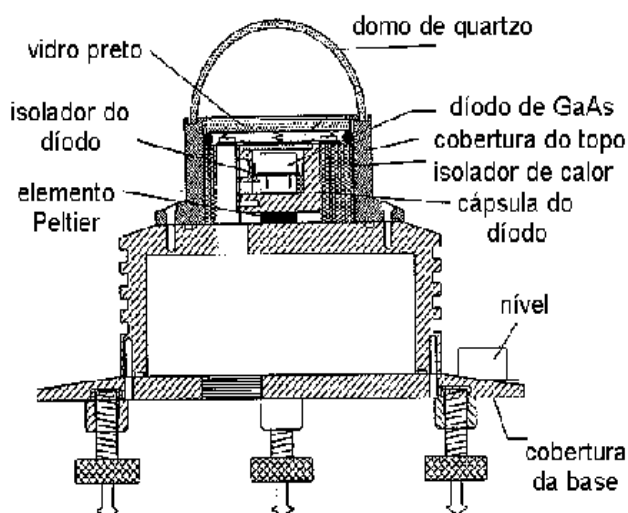


Figura 2 – Diagrama esquemático do Biômetro (Fonte: Solar Light Co. INC.)

Figure 2 – UV – Biometer's scheme (After Solar Light Co., INC.)

revelou-se inadequado para a determinação da tendência a longo prazo na radiação UV-B (Weatherhead et al., 1997), apresentado resultados de decréscimo no UV-B (Scotto et al., 1988), diferente do esperado devido ao decréscimo no ozônio total (Frederick & Lubin, 1994) e contrário à maior parte das medidas mais recentes, indicando um aumento na radiação UV-B relacionado à redução no ozônio total (Kerr & McElroy, 1993). O princípio da medição baseia-se na detecção da luz emitida por um elemento composto de fósforo, com um diodo de arseneto de gálio-GaAs. A radiação solar que atinge o domo do radiômetro é parcialmente filtrada de modo que a luz que excita o componente de fósforo corresponde à radiação UV na faixa 280-380 nm. A radiação medida é ponderada com o espectro de ação de eritema de McKinlay & Diffey (1987), simulando a sensibilidade da pele humana à radiação UV-B. O tempo de integração geralmente utilizado é de 1 hora e o resultado obtido é a dose de energia danosa à pele humana, em MED. A resposta do cosseno do ângulo solar zenital do sensor resulta em um erro de no máximo 6 % para ângulos solares de zênite $< 70^\circ$. A Fig. 2 apresenta o diagrama esquemático de um Biômetro.

Para determinar a característica espectral da radiação medida pelo Biômetro realizou-se a convolução entre o espectro de ação de eritema de McKinlay-Diffey, utilizado pelo instrumento para filtrar a radiação UV, e a irradiância espectral na superfície terrestre, medida pelo espectrofotômetro Brewer instalado em La Paz, Bolívia, no dia 15 de setembro de 1996, ao meio dia local, com ângulo solar zenital $\theta = 22^\circ$, apresentados na Fig. 3. A Fig. 4 mostra a curva de irradiância ponderada resultante da

convolução, característica da resposta do instrumento ao meio-dia local, com o pico a 305 nm e largura de banda (HPTW) de 14, 5 nm.

É importante salientar que a curva de resposta ponderada do Biômetro depende do ângulo solar zenital. Conforme o ângulo solar zenital varia, a intensidade de radiação na superfície terrestre varia, e o máximo da convolução com o espectro de ação será transladado. A Tab. 3 apresenta a variação do comprimento de onda máximo com o ângulo solar zenital para o dia 15/09/1996 obtido pelo espectrofotômetro Brewer de La Paz. Observa-se que o pico da radiação ponderada desloca-se para comprimentos de onda maiores conforme aumenta o ângulo solar zenital, mas até ângulos solares médios, ao redor de 45°, o pico mantém-se em 305 nm.

Os resultados obtidos na análise da curva de resposta do Biômetro de La Paz foram semelhantes aos obtidos com as curvas de resposta de outras estações de observação, com a utilização do mesmo método aqui descrito.

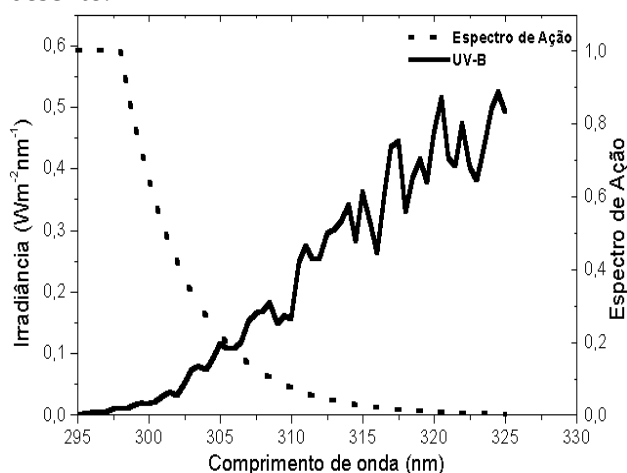


Figura 3 – Espectro de Ação de Eritema e Espectro UV na superfície terrestre para o dia 15/09/1996, ao meio-dia local, em La Paz.

Figure 3 – Erythemal Action Spectrum and UV Spectrum at ground level for La Paz, September 15th, 1996, at local noon.

Ângulo Solar de Zênite	Comprimento de onda máximo (nm)
19,47°	305
43,40°	305
63,00°	311
72,50°	311
81,00°	317

Tabela 3 – Variação do comprimento de onda de pico da radiação medida pelo Biômetro com o ângulo solar zenital para o dia 15/09/1996 em La Paz, Bolívia.

Table 3 – Variation of maximum wavelength of radiation measured by UV – Biometer with solar zenith angle, for September 15, 1996, La Paz.

Os Biômetros são calibrados freqüentemente, sendo a mais recente calibração em fevereiro de 1998 em Natal, com um instrumento padrão do fabricante, *Solar Light Co., Inc.* Os instrumentos foram enviados à Natal, onde foram calibrados e intercomparados com um padrão do fabricante especialmente importado para esta finalidade. Todos os equipamentos foram intercomparados com o padrão, e desta calibração fatores de escala e termos de calibração foram obtidos para cada equipamento e aplicados para corrigir as séries temporais.

ANÁLISE DA VARIAÇÃO SAZONAL

Neste trabalho foram utilizados os dados observacionais obtidos pelas estações de Blumenau (SC), Cachoeira Paulista (SP), Campo Grande (MS), Natal (RN), Porto Alegre (RS) e Ribeirão Preto (SP) no Brasil, e La Paz na Bolívia e Punta La Paz no Chile, com o objetivo de analisar a variação sazonal e as amplitudes relativas intersazonais de acordo com a latitude geográfica, calcular o Índice UV e obter sua distribuição espacial e temporal.

Para analisar a variação sazonal da Radiação UV-B Eritema foram selecionados os valores máximos diários de dose de radiação, em geral, próximos ao meio-dia local, a fim de permitir a confecção das séries temporais para as localidades e os períodos dados na Tab. 2. A Tab. 4 apresenta o mínimo e o máximo valores do ângulo solar zenital para cada estação, ao meio-dia local, demonstrando a variabilidade deste parâmetro com a latitude geográfica. As Figs. 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 e 12 apresentam as séries temporais das doses de radiação máximas diárias para estas estações de observação.

Analisando-se as séries temporais apresentadas nas Figs. 5 a 12 verifica-se o caráter marcadamente sazonal da variação da Radiação UV-B Eritema, associada ao ciclo anual do ângulo solar zenital,

Regiões	Máximo anual do ângulo solar zenital	Mínimo anual do ângulo solar zenital
Natal	0°	30,7°
La Paz	3,8°	40,8°
Campo Grande	1,7°	42,8°
Ribeirão Preto	0,33°	44,7°
Cachoeira Paulista	0,38°	46,4°
Blumenau	4,3°	50,4°
Porto Alegre	8,13°	54,2°
Punta Arenas	29,8°	76,7°

Tabela 4 – Valores mínimo e máximo anuais do ângulo solar zenital ao meio-dia local para as estações de observação.

Table 4 – Solar zenith angle minimum and maximum annual values at local noon for the observational sites.

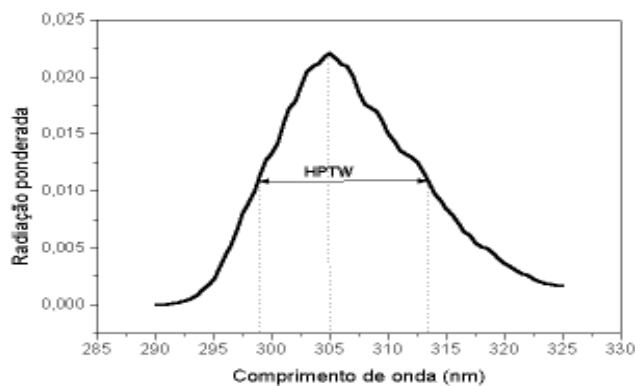


Figura 4 – Convolução entre o Espectro de Ação de Eritema e o Espectro UV na superfície terrestre.

Figure 4 – Convolution between Erythemal Action Spectrum and UV Spectrum at ground level.

já era esperado, visto que a maior variação imposta ao UV-B não é a do ozônio e sim a do ângulo solar zenital. Este efeito impõe a variação geográfica, com radiação mais intensa em menores latitudes, por exemplo, maior na região de Campo Grande e de Natal, do que nas regiões de Porto Alegre e de Punta Arenas. O efeito de altitude também é observado, com as doses de radiação da região de La Paz superando as da região de Campo Grande, com ambas as estações de observações na mesma faixa latitudinal, o que ocorre devido a uma coluna de ozônio proporcionalmente menor e uma troposfera mais rarefeita, o que diminui a atenuação de radiação por espalhamento.

O comportamento errático algumas vezes apresentado nos dados, é causado pelas diferentes condições de transparência atmosférica associada à variabilidade no ozônio, aerossóis e tipo e cobertura de nuvens. Este comportamento errático da radiação é bem conhecido como sendo influenciado por diferentes condições de dia para dia na nebulosidade atmos-

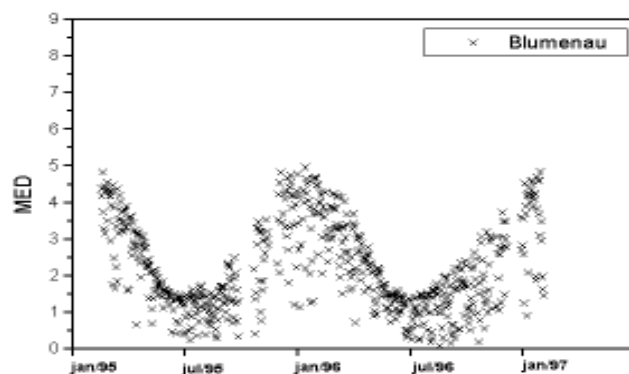


Figura 5 – Série temporal dos máximos diários de dose de radiação UV para a estação de observações de Blumenau.

Figure 5 – Time series of daily maximum UV dose for observational site of Blumenau.

férica (Diaz et al., 1996).

A distribuição sazonal da radiação, calculando-se os valores médios para cada estação do ano, foi analisada, adotando-se o critério de Sasaki et al. (1993) para agrupar os dados em estações do ano. Os dados foram separados em “Verão” (Novembro, Dezembro, Janeiro e Fevereiro), “Outono” (Março, Abril), “Inverno” (Maio, Junho, Julho e Agosto) e “Primavera” (Setembro e Outubro). Calculou-se o valor médio para cada estação do ano, e posteriormente encontrou-se a razão da radiação média de “Verão” pela radiação média de “Inverno”.

Para analisar a distribuição das médias sazonais e razões intersolsticiais de “Verão”/“Inverno”, escolheram-se as estações de observação de Natal, Cachoeira Paulista, Campo Grande e Porto Alegre, cobrindo a extensão latitudinal de 5°S a 30°S, e a estação de La Paz, para comparar os efeitos de altitude. O procedimento efetuado foi: i) a partir dos valores diários de dose, registrou-se os valores máximos para cada

Regiões	Meses com Índice UV alto (7 < I-UV < 9)	Meses com Índice UV muito alto (I-UV > 10)
Blumenau	janeiro, fevereiro, março e dezembro	
Cachoeira Paulista	março, outubro e novembro.	janeiro, fevereiro e dezembro.
Campo Grande	abril, setembro e outubro.	janeiro, fevereiro, março, novembro e dezembro.
La Paz	maio, junho e julho.	janeiro, fevereiro, março, abril, agosto, setembro, outubro, novembro e dezembro.
Natal	maio, junho e julho.	janeiro, fevereiro, março, abril, agosto, setembro, outubro, novembro e dezembro.
Porto Alegre	janeiro, fevereiro, março, novembro e dezembro.	-

Tabela 5 – Meses para cada estação de observação com médias de Índices UV altas ou muito altas.

Table 5 – Months for each observational site with high or very high values for UV – Index.

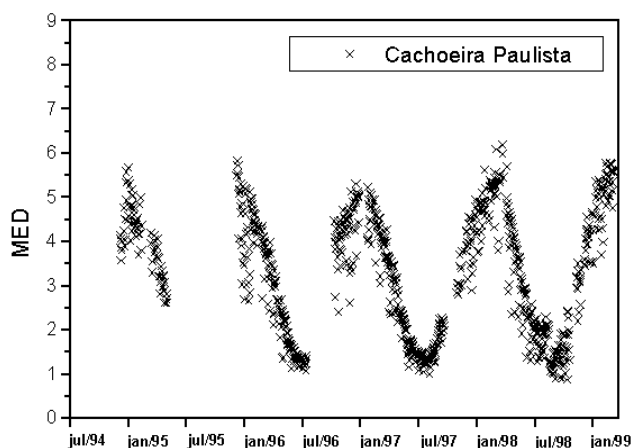


Figura 6 – Série temporal dos máximos diários de dose de radiação UV para a estação de observações de Cachoeira Paulista.

Figure 6 – Time series of daily maximum UV dose for observational site of Cachoeira Paulista.

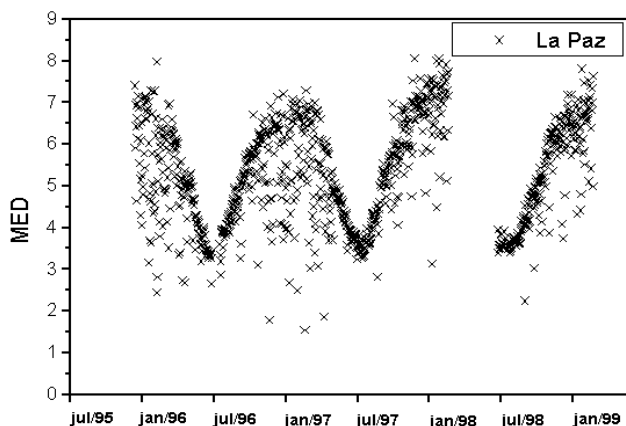


Figura 8 – Série temporal dos máximos diários de dose de radiação UV para a estação de observações de La Paz.

Figure 8 – Time series of daily maximum UV dose for observational site of La Paz.

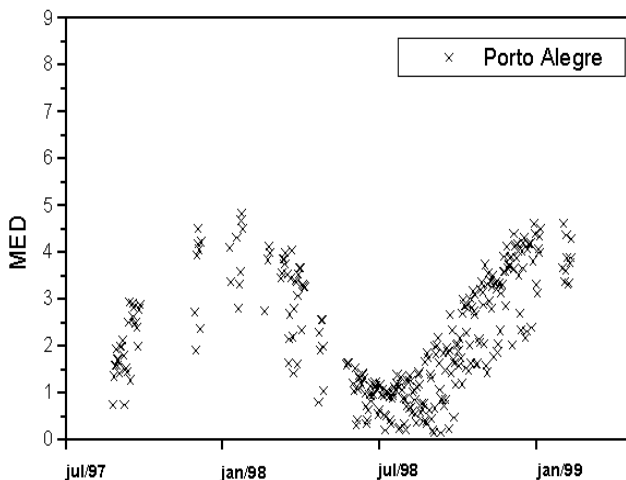


Figura 10 – Série temporal dos máximos diários de dose de radiação UV para a estação de observações de Porto Alegre.

Figure 10 – Time series of daily maximum UV dose for observational site of Porto Alegre.

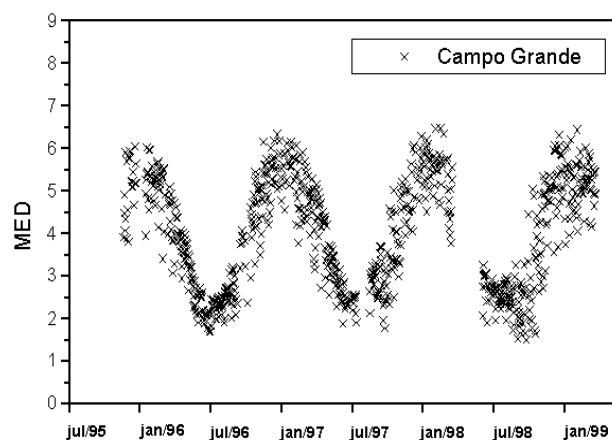


Figura 7 – Série temporal dos máximos diários de dose de radiação UV para a estação de observações de Campo Grande.

Figure 7 – Time series of daily maximum UV dose for observational site of Campo Grande.

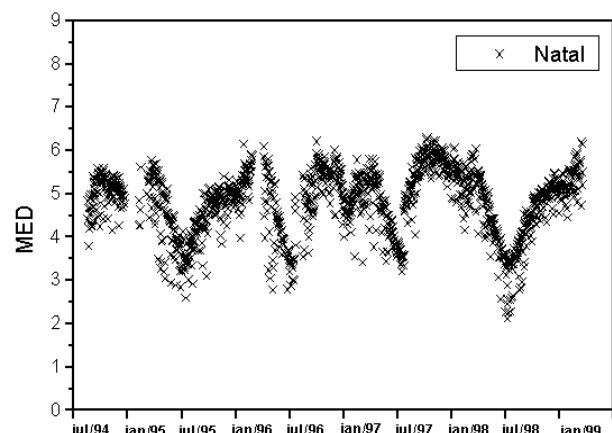


Figura 9 – Série temporal dos máximos diários de dose de radiação UV para a estação de observações de Natal.

Figure 9 – Time series of daily maximum UV dose for observational site of Natal.

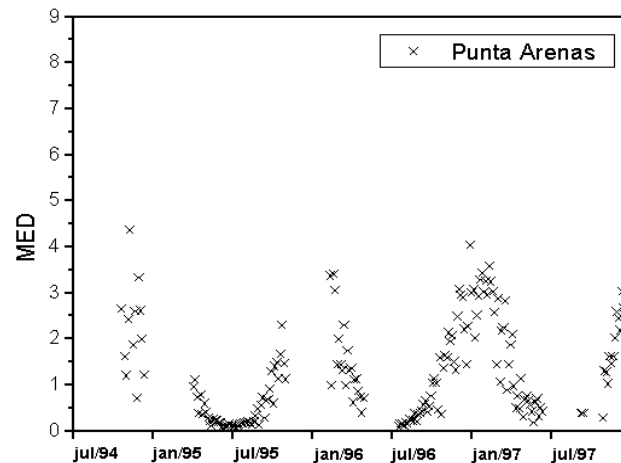


Figura 11 – Série temporal dos máximos diários de dose de radiação UV para a estação de observações de Punta Arenas.

Figure 11 – Time series of daily maximum UV dose for observational site of Punta Arenas.

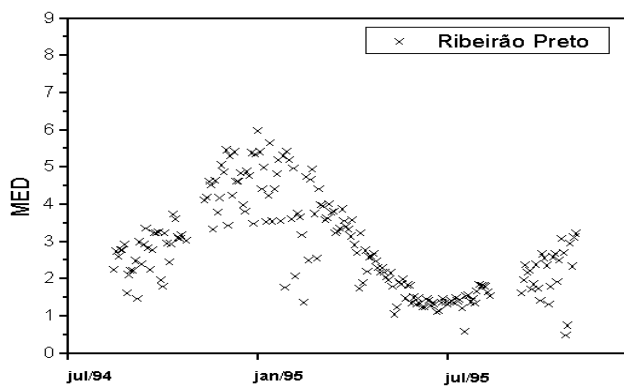


Figura 12 – Série temporal dos máximos diários de dose de radiação UV para a estação de observações de Ribeirão Preto.

Figure 12 – Time series of daily maximum UV dose for observational site of Ribeirão Preto.

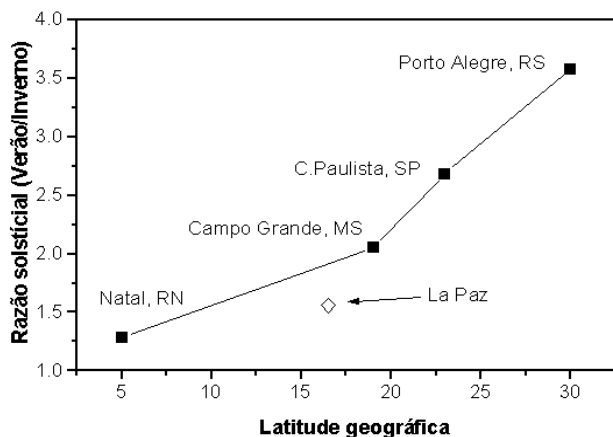


Figura 14 – Razão solsticial verão/inverno da dose de radiação em função da latitude geográfica para as estações de observações de Natal, Campo Grande, Cachoeira Paulista, Porto Alegre e Natal.

Figure 14 – Summer/winter seasonal ratio of radiation dose versus geographical latitude for observational sites of Natal, Campo Grande, Cachoeira Paulista, Porto Alegre and Natal.

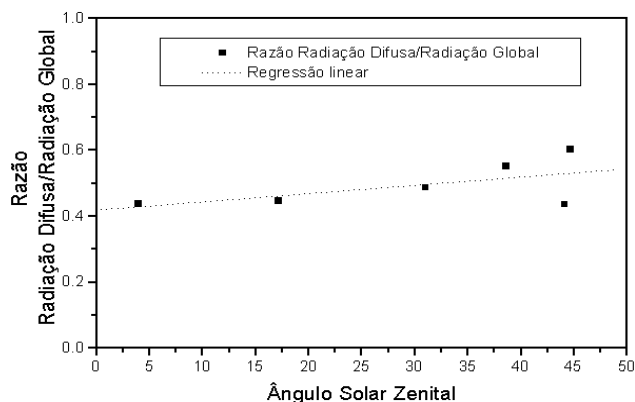


Figura 16 – Razão radiação UV-Eritema difusa/radiação UV-Eritema global em função do ângulo solar de zênite para o experimento observacional realizado em Cachoeira Paulista em 24 e 25 de novembro de 1998.

Figure 16 – Diffuse Erythemal-UV radiation/global Erythemal-UV radiation ratio versus solar zenith angle for observations realized at Cachoeira Paulista on November, 24th and November 25th, 1998.

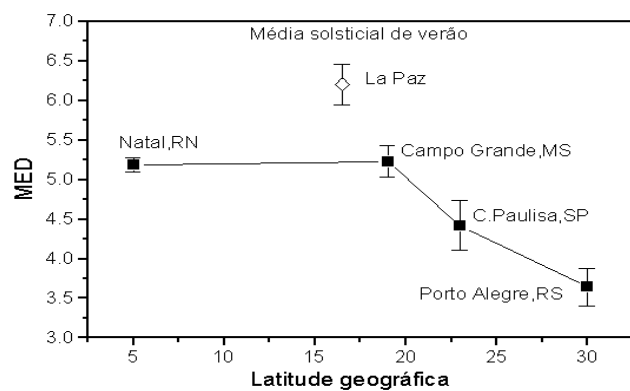


Figura 13 – Média solsticial de verão da radiação UV - Eritema em função da latitude geográfica para as estações de observações de Natal, Campo Grande, Cachoeira Paulista e Porto Alegre.

Figure 13 – Summer season Erythemal UV radiation averages versus geographical latitude for observational sites of Natal, Campo Grande, Cachoeira Paulista and Porto Alegre.

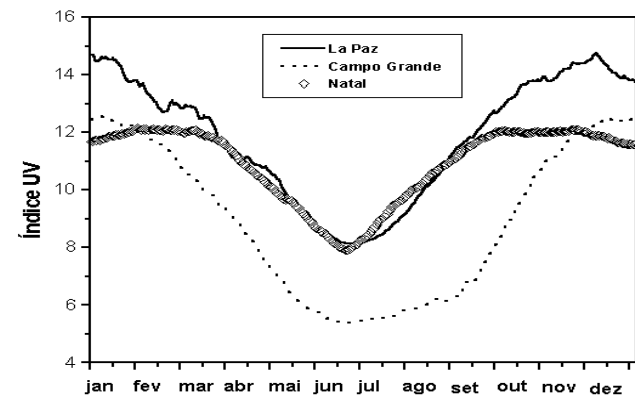


Figura 15 – Curvas suavizadas de 30 pontos para os valores médios diários do Índice UV para as estações de observações de Campo Grande, La Paz e Natal.

Figure 15 – 30 point running averages for daily averages of UV-Index calculated for the observational sites of Campo Grande, La Paz and Natal.

rios de dose, registrou-se os valores máximos para cada dia, de 1 a 365 (data em calendário juliano), de cada ano; ii) com estes valores diários de cada ano calculou-se uma curva média para cada estação de observação; iii) posteriormente calcularam-se as médias mensais e, iv) as médias para cada grupo sazonal.

Na Fig. 13 apresenta-se a média solsticial de “verão” em função da latitude geográfica para Natal, Campo Grande, Cachoeira Paulista e Porto Alegre. Nota-se que a média sazonal diminui com o aumento da latitude geográfica, pela variação do ângulo solar zenital, mas também pela distribuição geográfica do ozônio, pois há menos ozônio total na região equatorial (Whitten & Prasad, 1985). A média sazonal de La Paz também é apresentada para comparação, sendo muito maior que a de qualquer outra estação, mesmo de latitudes equatoriais, devido à grande altitude da região

de La Paz.

A Fig. 14 apresenta a razão da dose de radiação para o “verão” e para o “inverno” em função da latitude geográfica das estações de observações de Natal, Campo Grande, Cachoeira Paulista e Porto Alegre. Observa-se que a razão “verão”/“inverno” aumenta com a latitude geográfica. Tal efeito está associado aos maiores ângulos solares zenitais e maiores colunas totais de ozônio em maiores latitudes (Whitten & Prasad, 1985), que amplificam a atenuação da radiação no inverno. A razão verão/inverno para La Paz, também apresentada na Fig. 14, é menor que qualquer outra latitude, ou seja, em La Paz há uma menor variabilidade da radiação entre as estações de inverno e verão.

DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE UV

A partir do máximo valor da dose de radiação para cada dia e em cada estação de observação, calcularam-se os Índices UV máximos diários. Numa segunda etapa foram calculados os valores médios para cada dia do ano, de 1 a 365, utilizando-se todos os dados dos períodos de observação. Obteve-se a curva anual média de todo período de observações, representativa do Índice UV, para o período de dados disponível, em cada estação de observação. Da curva anual do Índice UV calculou-se uma curva suavizada, utilizando-se a média suavizada em 30 dias. A Fig. 15 apresenta as curvas suavizadas do Índice UV calculadas para as estações de observação de Campo Grande, La Paz e Natal.

Como esperado, o Índice UV apresenta valores mais altos para menores latitudes geográficas. Exceção ocorre para a região de La Paz, onde a curva anual de Índice UV apresenta valores superiores às curvas de outras estações de observação, inclusive da região de Natal. A altitude de La Paz torna a radiação mais intensa que em latitudes equatoriais. Em Natal observa-se a ocorrência de dois máximos anuais, em fevereiro e outubro, causado pela variação anual do ângulo solar zenital, que em estações situadas entre os trópicos, apresenta valor mínimo duas vezes ao ano.

Com os Índices UV calculados, pode-se determinar o período do ano, para cada estação de observação no qual o Índice UV atinge valores altos ou muito altos, conforme a Tab. 2. A Tab. 5 contém um resumo informando os meses em que o Índice UV é alto ($7 < I\text{-}UV < 9$) ou muito alto ($I\text{-}UV > 10$), para cada localidade. Das informações apresentadas na Tab. 5, observa-se que as regiões de La Paz na Bolívia, Natal e Campo Grande no Brasil, são as que apresentam a maior

frequência de Índices UV com valores muito altos, informação muito importante porque indica que nestas regiões as pessoas estarão mais expostas à radiação UV-B solar danosa aos seres humanos.

MEDIDAS DE RADIAÇÃO UV-B ERITEMA DIFUSA

A radiação global incidente em uma superfície horizontal apresenta duas componentes: a radiação direta, correspondendo ao feixe luminoso vindo diretamente do disco solar, e a radiação difusa, sendo esta a parcela de radiação solar extraída do feixe direto por espalhamento por partículas e moléculas presentes na atmosfera. O espalhamento molecular Rayleigh e a absorção e espalhamento por nuvens constituem os fenômenos físicos geradores da radiação difusa.

A radiação difusa é importante componente da radiação global na faixa do UV (Sasaki et al., 1993; Silva et al., 1999). Para obter um valor quantitativo da percentagem de radiação difusa para a radiação UV, um experimento foi realizado no Centro Espacial de Cachoeira Paulista do INPE, em 24 de novembro de 1998, utilizando o Biômetro e o Radiômetro UV de Superfície - GUV. A descrição do procedimento experimental para medir a radiação difusa e resultados para o Biômetro e para o GUV é dada em Silva et al. (1999). O trabalho foi executado em duas etapas, nos dias 24 e 25 de novembro de 1998. No dia 24 de novembro obtiveram-se medidas de radiação difusa bloqueando o componente direto de radiação solar sobre os medidores, e no dia 25 de novembro os medidores operaram normalmente, medindo a radiação UV global. Echer (1999) e Silva et al. (1999) apresentaram os resultados das curvas diurnas obtidos para o Biômetro e para o GUV.

A Fig. 16 apresenta a variação da razão radiação difusa/radiação global em função do ângulo solar zenital. A linha tracejada é uma reta de regressão linear. Observa-se que a razão aumenta com o ângulo solar zenital, ou seja, há maior percentagem de radiação difusa na radiação UV-B Eritema global quanto maior o ângulo zenital. Isto é justificado pelo maior caminho óptico geométrico atravessado na atmosfera pelo feixe solar com maiores ângulos solares zenitais. Com este maior caminho, os fótons solares encontrarão maior número de moléculas e partículas atmosféricas absorvedoras e espalhadoras, e em consequência o feixe direto será mais atenuado.

O menor valor encontrado para a percentagem de radiação difusa, ao meio-dia local, foi de 44%. Resultados de outros autores apresentam valores semelhantes

de radiação difusa UV-B Eritema. McKenzie et al. (1992) relataram o resultado de uma medida de radiação UV difusa ponderada com o espectro de ação de eritema de McKinlay-Diffey, para Lauder, Nova Zelândia, com coordenadas geográficas Lat. 45,0° S e Long. de 170° E, observando que para o meio dia local cerca de 45% da radiação na faixa espectral medida era difusa. Sasaki et al. (1993) que mediram a componente difusa em dois dias sem nebulosidade, nas coordenadas geográficas Lat. 35° N e Long. 139° E, no Japão, encontraram para a razão radiação difusa/radiação global no UV-B um valor superior a 50% para o meio dia local. Os resultados de medidas de radiação difusa no UV, como por exemplo nos trabalhos de McKenzie et al. (1992), Sasaki et al. (1993), Blumthaler et al. (1994), Silva et al. (1999) indicam que mesmo em dias sem nuvens cerca de metade da radiação UV-B global se apresenta sob a forma de radiação difusa, devido aos diversos tipos de espalhamento.

CONCLUSÕES

A análise das séries temporais das doses máximas diárias de radiação UV-B Eritema para as estações de observação utilizando o Biômetro, mostraram a sazonalidade da radiação UV-B Eritema, as diferenças com relação à latitude geográfica, e com a altitude. Os índices UV calculados para as estações de observação resultaram em curvas médias para cada estação e na elaboração da Tab. 5, apresentando os meses do ano em que o Índice UV apresenta valores mais altos, que indicam maior grau de exposição à radiação UV danosa para as pessoas. Encontrou-se que o Índice UV é muito alto particularmente para as regiões de La Paz, Campo Grande e Natal. A medida de radiação difusa no UV-B mostra uma contribuição significativa na componente global. O valor mínimo encontrado para a percentagem de radiação difusa na radiação UV-B Eritema global foi de 45%.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio do INPE e financiamentos vários de CNPq e FAPESP.

REFERÊNCIAS

- BLUMTHALER, M., AMBACH, W. & SALZGEBER, M. – 1994 - Effects of Cloudiness on Global and Diffuse Irradiance in a High-Mountain Area. *Theor. Appl. Climatol.*, **50**: 23-30.
- BOJKOV, R. D., BISHOP, L. & FIOLETOV, V. E. – 1995 - Total ozone trends from quality-controlled ground based data (1964-1994). *J. Geophys. Res.*, **100**(D12): 25867-25876.
- DIAZ, S. B., FREDERICK, J. E., LUCAS, T., BOOTH, C. R. & SMOLSKAIA, I. – 1996 - Solar UV irradiance at Tierra del Fuego: comparisons of measurements and calculations over a full annual cycle. *Geophys. Res. Lett.*, **23**(4): 355-358.
- ECHER, E. – 1999 - Observação da Radiação Ultravioleta Solar Tipo B em Banda Larga. Dissertação de Mestrado em Geofísica Espacial, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, INPE-7254-TDI/697.
- ECHER, E., KIRCHHOFF, V. W. J. H., SAHAI, Y., PAES LEME, N., SILVA, A. A., PAVÃO, H., SCHUCH, N. J., ZARATTI, F. & VALDERRAMA, V. – 1999 - A Rede de Detectores de Radiação Ultravioleta Solar do INPE, CD-ROM, Sexto Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, Rio de Janeiro, RJ.
- FARMAN, J. C., GARDINER, B. G. & SHANKLIN, J. D. – 1985 - Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO_x/NO_x interaction. *Nature*, **315**: 207-210.
- FREDERICK, J. E. & LUBIN, D. – 1994 - Solar Ultraviolet Irradiance at Palmer Station, Antarctica.. *Ultraviolet Radiation in Antarctica: Measurements and Biological Effects.*, Antarctic Research Series, **62**: 43-52.
- KERR, J. B. & McELROY, C. T. – 1993 - Evidence for Large Upward Trends of Ultraviolet-B Radiation Linked to Ozone Depletion. *Science*, **262**: 1032-1034.
- KIRCHHOFF, V. W. J. H. – 1995 - Ozônio e Radiação UV-B, Transtec Editorial, São José dos Campos, 149p.
- KIRCHHOFF, V. W. J. H., ALVES, J. R., SILVA, F. R., MOTTA, A. G., CHAGAS, J. R., VALDERRAMA, V., ZAMORANO, F. & CASICCIA, C. – 1993 - The Brazilian Network of Stratospheric Ozone Monitors: Observations of the 1992 Ozone Hole. *Rev. Bras. Geofís.* **11**(2): 205-214.
- KIRCHHOFF, V. W. J. H., SCHUCH, N. J., PINHEIRO, D. K. & HARRIS, J. M. – 1996 - Evidence for an Ozone Hole Perturbation at 30° South. *Atmospheric Environment*, **30**(9): 1481-1488.
- KIRCHHOFF, V. W. J. H., CASICCIA, C. A. R. & ZAMORANO, F. – 1997a - The ozone hole over Punta Arenas, Chile. *J. Geophys. Res.*, **102**(D7): 8945-8953.
- KIRCHHOFF, V. W. J. H., SAHAI, Y., CASICCIA, C., ZAMORANO, F. & VALDERRAMA, V. – 1997b - Observations of the 1995 ozone hole over Punta Arenas, Chile. *J. Geophys. Res.* (**102**): 16109-16120.
- KIRCHHOFF, V. W. J. H., ZAMORANO, F. & CASICCIA, C. – 1997c - UV-B enhancements at Punta Arenas, Chile. *J. Photochem. Photobiol.* **38**: 174-177.
- KRZÝSCIN, J. – 1996 - UV controlling factors and trends derived from the ground-based measurements taken at Belsk, Poland, 1976-1994. *J. Geophys. Res.*, **101**(D11): 16797-16805.

- LENOBLE, J. – 1993** - Atmospheric Radiative Transfer. A DEEPAK Publishing, Hampton, 532p.
- MADRONICH, S. – 1993** - UV radiation in the natural and perturbed atmosphere, In UV-B Radiation and Ozone Depletion. . Tevini, M. ed. Lewis Publisher, p. 17-69.
- McKENZIE, R. L., JOHNSTON, P. V., KOTKAMP, M., BITTAR, A. & HAMLIN, J. D. – 1992** - Solar ultraviolet spectroradiometry in New Zealand: instrumentation and sample results from 1990. Appl. Optics, **31**(30) : 6501–6509.
- McKINLAY, A. F. & DIFFEY, B. L. – 1987** - A reference action spectrum for ultraviolet-induced erythema in human skin. In Human exposure to ultraviolet radiation: Risks and regulations. Passchler and Bosnjakovic ed., Amsterdã, Elsevier.
- SASAKI, M., TAKESHITA, S., SUGIURA, M., SUDO, N., MIYAKE, Y, FURUSAWA, Y. & TOSHIBUMI, S. – 1993** - Ground-Based Observation of Biologically Active Solar Ultraviolet-B Irradiance at 35° N Latitude in Japan. J. Geomag. Geoelectr., **45**: 473-485.
- SCOTTO, J., COTTON, G., URBACH, F., BERGER, D. & FEARS, T. – 1988** – Biologically effective ultraviolet radiation: Surface measurements in the United States, 1974 to 1985, Science, **239**: 762-764.
- SILVA, A. A., ECHER, E. & KIRCHHOFF, V. W. J. H. – 1999** - Medidas da Radiação UV-B Difusa em Banda Larga e Estreita, CD-ROM, Sexto Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, Rio de Janeiro, RJ.
- SOLOMON, S., GARCIA, R. R., ROWLAND, F. S. & WUIBBLES, D.J. – 1986** - On the depletion of Antarctic ozone. Nature, **321**(19): 755–758.
- WEATHERHEAD, E. C., TIAO, G. C., REINSEL, G. C., FREDERICK, J. E., DELUISI, J. J., CHOI, D. & TAM, W. – 1997** - Analysis of long-term behavior of ultraviolet radiation measured by Robertson-Berger meters at 14 sites in the United States. J. Geophys. Res. **102**(D7): 8737- 8754.
- WHITTEN, R. C. & PRASAD, S. S. - 1985** - Ozone in Free Atmosphere, Van Nostrand Reinhold Company, New York, 288p.

Manuscript submitted September 22, 1999
Revised version accepted April 20, 2000

The Seasonal Variation of Biologically Active Solar UV-B Radiation

Because of ozone depletion in the stratosphere it is expected that solar UV-B radiation intensities will increase at ground level. This is a medical concern since UV-B radiation is biologically active, in the sense that it interferes with living cells in a negative way. To humans, excess UV-B can cause skin cancer, for example. More common to some excess radiation is the so called Erythema, the reddening of human skin. Since the biological sensitivity is not uniform for different wavelengths, this is taken into account by weighting the UV-B range by an action spectrum. The radiation data here reported have been weighted for the Erythema action spectrum, so that the radiation can be considered biologically active radiation. This radiation intensity has been monitored at several sites in Brazil (Natal, Campo Grande, Cachoeira Paulista, Ribeirão Preto, Blumenau, Porto Alegre) and in Bolívia (La Paz) and Chile (Punta Arenas), and time series of daily maximum values are presented, evidencing the seasonal variation. Average UV-B Indices are also obtained for these sites. The main result of this work was to obtain an annual mean curve of UV-B radiation at noon for each observational site. It was

observed that the UV-B radiation had a latitudinal and altitudinal dependency, as expected. Because of these factors, higher values were observed at La Paz (higher altitude) and at Natal (lower latitude). For Punta Arenas, the site with the higher latitude, UV-B values were lower and had a larger annual variability, with the summer winter ratio of 10, as compared with a ratio of about 1.5 for La Paz and 1.25 for Natal, as a result of larger solar zenith angles at Punta Arenas. With the annual mean curve, the UV Index was calculated for each site, and it was observed that La Paz, Campo Grande and Natal had the higher values. It was observed at summer that at La Paz the UV-Index was close to 15, while for Campo Grande and Natal it was above 12. UV-Index values are high during the whole year for La Paz, Campo Grande and Natal, which indicates that persons in these regions are more exposed to damaging ultraviolet radiation during most of the year. A special experiment to measure diffuse UV-B radiation was made at Cachoeira Paulista, November 1998. From this experiment, it was observed that diffuse radiation is at least 45% of the measured Erythemal UV radiation, at local noon.

NOTAS SOBRE OS AUTORES
*NOTES ABOUT THE AUTHORS***Volker Walter Johhann Heinrich Kirchhoff**

PhD, funcionário do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), é autor de mais de setenta artigos publicados em revistas de circulação internacional com revisor; autor de 3 livros (um deles sendo "Ozônio e Radiação UV-B"); foi o coordenador Brasileiro de vários experimentos internacionais de grande vulto no Brasil, como as missões da NASA TRACE-A de 1992, e a mais recente missão SCAR-B em 1995. É um ex-membro do IGAC e presidente do COSPAR/Brasil. Exerceu diversos cargos administrativos no INPE, sendo atualmente o chefe do Laboratório de Ozônio, Coordenador de Programas Especiais e Diretor Substituto.

Ezequiel Echer

Formado em Engenharia Química pela Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, em 1997. Mestre em Geofísica Espacial pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, em 1999, com a dissertação "Observações da Radiação Ultravioleta Solar Tipo B em Banda Larga", com orientação do Dr. Volker Kirchhoff.

Principais áreas de interesse: radiação ultravioleta solar, ozônio atmosférico, aeronomia da troposfera e estratosfera terrestre, efeitos da atividade solar na radiação UV-B e ozônio.

Neusa Paes Leme

Bacharel em Física pela Universidade Oswaldo Cruz, 1979, mestre em Radio Astronomia e Física Solar em 1986 e doutora em

Ciências Espaciais em 1994, pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

Área de atuação: de 1980 a 1996 integrante do departamento de Astrofísica/Radio Astronomia e Física Solar do INPE, estudando os efeitos de fontes ionizantes de origem solar (raios-x, elétrons e prótons de alta energia) e não solar (meteoritos) na baixa ionosfera. A partir de 1996, integrante da equipe do Laboratório de Ozônio do INPE, organizando o banco de dados de ozônio e radiação ultravioleta coletados pelas diversas estações localizadas no Brasil, Chile, Bolívia e Antártica.

Membro do *Programa Antártico Brasileiro* desde 1984, participando em campanhas de coleta de dados na Estação Antártica Brasileira Comandante Ferraz, para o estudo da baixa ionosfera, desde 1985 e no monitoramento da radiação ultravioleta desde 1996.

Abel A. Silva

Bacharel em Física e Mestre em Ciências e Técnicas Nucleares pela Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. Trabalhou por vários anos com desenvolvimento de contadores proporcionais para detecção de radiação gama e de nêutrons. Atualmente faz doutorado em Geofísica Espacial no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, onde desenvolve um trabalho sobre radiação ultravioleta no Laboratório de Ozônio.

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
CENTRO DE ESTUDOS GERAIS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA
LABORATÓRIO DE GEOLOGIA MARINHA
LAGEMAR

Av. Litorânea, s/nº - Campus da Praia
24210-340 - Gragoatá - Niterói - RJ
Tel./Fax: 021-719-4241