

RADIAÇÃO SOLAR UV MÁXIMA MENSAL PARA O ESTADO DE PERNAMBUCO

C. Tiba¹, S. S. Leal², M. H. Campos³

Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco (IFPE)
Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)
Av. Prof. Luiz Freire, 1000 – CDU - CEP 50.740-540, Recife, PE, Brasil
Tel.:+5581 3453 6019, Fax: +55 81 32718250
email: tiba@ufpe.br

RESUMO: No ano de 2008 foram instaladas duas estações de medição, uma na cidade de Pesqueira, e a outra na cidade de Araripina com o objetivo de coletar a radiação global e UV (A+B). As medições possibilitaram a criação de modelos para calcular a radiação UV (A+B) nas regiões circunvizinhas, conhecendo-se a radiação global. Para outras localidades utilizou-se o modelo paramétrico computacional SPECTRAL2 a partir de dados de entrada como profundidade ótica de aerossóis, temperatura ambiente, pressão, e outros. Para o cálculo da profundidade ótica de aerossóis foi utilizada uma equação empírica a partir do índice de turbidez de linke para a massa de ar 2 (TL_m), profundidade ótica do vapor d'água e da atmosfera limpa e seca. Com os modelos foi possível gerar um mapa mensal UV (máximo) para o estado de Pernambuco. Este mapa será importante para alertar a população sobre a cegueira e prevenção do câncer de pele.

Palavras Chaves: radiação solar UV, espectro de ação eritêmica, profundidade ótica de aerossol, sol optical depth; linke turbidity index

INTRODUÇÃO

A localização geográfica muito próxima da linha do Equador faz com que os níveis de radiação solar UV sejam elevados praticamente todo o ano no estado de Pernambuco. Conhecer os níveis desta radiação é de fundamental importância para alertar e prevenir a população sobre os possíveis danos, devido ao excesso de exposição. Sardas, cataratas, eritemas e câncer de pele são efeitos biológicos resultantes desta exposição. Os efeitos da radiação ultravioleta em sistemas biológicos mostram uma forte dependência em relação ao comprimento de onda. Para o estudo de efeitos biológicos utilizam-se fatores de ponderação, os quais atribuem-se pesos maiores para comprimentos de onda de maior interação biológica. A resposta biológica aos diferentes comprimentos de onda é descrita por um espectro de ação. O espectro de ação é determinado através de experimentos médicos que analisam o efeito biológico de diferentes comprimentos de onda de radiação (Kirchoff et. al., 2000). A Figura 1 representa o espectro de ação eritêmica para pele humana.

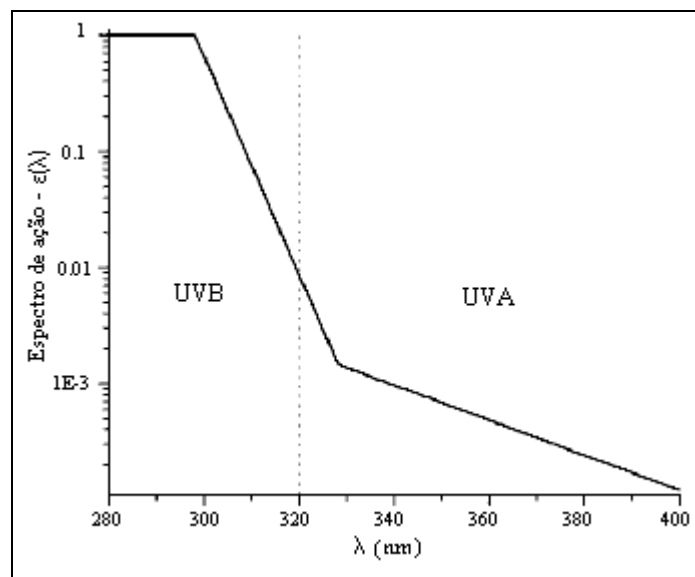


Figura 1: Espectro de ação eritêmica (Diffey, 1991).

A irradiância espectral I_λ ponderada pelo espectro de ação ϵ_λ , resulta na irradiância eritêmica espectral S_λ , em $W / (m^2 nm)$. Integrando-se a irradiância eritêmica espectral S_λ , para intervalo de comprimentos de onda referentes à radiação ultravioleta, obtém-se a irradiância biologicamente ativa S , que no caso dos seres humanos, também é chamada de irradiância eritêmica.

$$S = \int_{280}^{400} I_\lambda \epsilon_\lambda d\lambda \quad (1)$$

A unidade da irradiância eritêmica é dada em DEM (dose erimatososa mínima), que equivale aproximadamente a $210 J / m^2$. O índice ultravioleta (IUV), relacionado aos níveis de irradiação UV que induzem à formação de eritemas na pele humana, é determinado a partir da irradiância eritêmica (WHO, 2002). Cada unidade de IUV corresponde a $25 mW / m^2$. A Tabela 1 mostra a classificação desses índices.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	>11
BAIXO		MODERADO			ALTO		MUITO ALTO			EXTREMO	
NENHUMA PRECAUÇÃO NECESSÁRIA		NECESSÁRIA PROTEÇÃO (PROTETOR SOLAR, CHAPÉU, CAMISA, PERMANECER NA SOMBRA)									

Tabela 1: Classificação do IUV e recomendações, conforme a Organização Mundial da Saúde.

Além da irradiância eritêmica, a radiação UV (A+B) é também um parâmetro de estudo importante não só para os seres vivos como também para materiais de aplicações externas, que sofrem degradações mediante o grau de exposição. Perante tais fatos, as informações referentes à radiação UV ainda são raras não só no estado de Pernambuco como também no restante do país. Com o objetivo de ampliar o conhecimento dos níveis de radiação UV, no estado de Pernambuco, no ano de 2008 foram instaladas estrategicamente três estações de medição, sendo, uma na cidade de Pesqueira, a 214 km da capital Recife, outra na cidade de Araripina situada a 690 km também da capital, com o objetivo de coletar simultaneamente a radiação global e UV (A+B). Em Recife foi instalada no final de 2009 uma estação para medir a irradiação eritêmica e com isso determinar o índice ultravioleta para aquela localidade. As cidades de Pesqueira e Araripina ficam localizadas respectivamente na zona do agreste e sertão, climas característicos do estado pernambucano. As medições possibilitaram a criação de modelos para calcular a radiação UV (A+B) nas regiões circunvizinhas, conhecendo-se a radiação global. Contudo, devido a grande diversidade climática do estado, utilizou-se o modelo paramétrico computacional SPECTRAL2 para calcular os níveis máximos de radiação UV (A+B), além do índice ultravioleta (IUV) para outras seis localidades, inclusive a capital Recife, situada na zona da Mata e que representa o terceiro clima característico do estado de Pernambuco. Para o cálculo da radiação UV (A+B) e IUV, o modelo necessitou de dados de entrada como profundidade ótica de aerossóis (AOD), ozônio, entre outros. Para o cálculo da profundidade ótica de aerossóis foi utilizada uma equação empírica a partir do índice de turbidez de linke para a massa de ar 2 (TL_m), profundidade ótica de vapor d'água e atmosfera limpa e seca.

MATERIAL E MÉTODOS

A Tabela 2 mostra as coordenadas geográficas e os períodos de medidas das estações de medição. As medidas realizadas nestes períodos referem-se à radiação global.

Estação	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Período de medição
Araripina	-7,46	-40,42	624	2000-2007
Arcoverde	-8,43	-37,05	716	2000-2007
Caruaru	-8,24	-35,91	488	1999-2007
Floresta	-8,60	-38,57	316	2002-2007
Ouricuri	-7,87	-40,09	451	2002-2007
Petrolina	-9,15	-40,37	366	1998-2002/2005-2007
Recife	-8,06	-34,92	10	1999-2005
S Talhada	-7,92	-38,29	430	2001-2004

Tabela 2- Coordenadas geográficas e os períodos de medidas.

O método usado para o cálculo do TL_m foi o seguinte: a partir de uma grande série temporal de radiação solar diária (mais de 5 anos) foi escolhida a radiação solar diária mais elevada de cada mês e de cada ano. Para cada localidade e cada mês, um modelo de céu claro foi processado para um TL_m , variando de 2 a 8 até que a radiação de céu claro correspondesse a um dos valores máximos anteriormente escolhido. O processo foi então repetido para outros valores máximos e meses obtendo-se 12 valores médios mensais de TL_m para o estado de Pernambuco (TIBA, and PIMENTEL, 2009).

A Tabela 3 mostra os índices de turbidez de linke mensais calculados, para as respectivas localidades.

Estação	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Ann
Araripina	4,9	5,6	4,5	4,2	3,5	3,2	2,6	2,5	3,1	3,4	4,1	4,1	3,8
Arcoverde	3,6	4,5	3,8	3,4	3,3	3,7	2,9	2,7	3,0	3,0	3,1	3,9	3,4
Caruaru	4,2	5,2	4,1	4,1	4,0	4,6	4,1	4,3	4,5	4,4	3,9	4,7	4,3
Floresta	4,5	4,6	3,7	4,1	3,8	4,3	3,7	3,4	3,8	4,0	4,2	4,4	4,0
Ouricuri	4,8	5,0	4,6	4,6	4,5	4,4	3,5	3,4	3,6	4,0	4,3	4,5	4,3
Petrolina	4,4	4,5	4,5	4,3	4,0	3,7	3,5	3,2	3,9	3,9	3,9	4,3	4,0
Recife	4,6	4,0	4,0	4,6	4,4	4,6	4,2	3,9	4,2	4,1	3,9	4,8	4,3
S Talhada	4,7	4,4	4,1	4,2	3,8	4,0	3,5	3,6	3,7	3,9	4,0	4,1	4,0

Tabela 3- Índice de turbidez de linke TL_m para as respectivas localidades

Para o cálculo da profundidade ótica foi utilizada a expressão (Molineaux, 1989):

$$T_{L2}(\Delta_a, W) = (9.4 + 0.9 * M) * (\Delta_{cda} + \Delta_W + \Delta_a) \quad (2)$$

onde,

Δ_a é a profundidade ótica de aerossóis.

Δ_{cda} é a profundidade ótica pancromática de uma atmosfera limpa e seca, que é dada por:

$$\Delta_{cda} = -0.101 + 0.235 * M^{-0.16} \quad (3)$$

M é a massa de ar (M = 2)

Δ_W é a profundidade ótica do vapor d'água pancromático.

$$\Delta_W = 0.12 * M^{-0.55} * W^{0.34} \quad (4)$$

W é a água precipitável contida na atmosfera (cm).

As profundidades óticas calculadas para as 8 localidades, a partir dos índices de turbidez de linke para massa de ar 2 (Tabela 3) juntamente com outros dados como latitude, longitude, ozônio, pressão atmosférica, entre outros, serviram de dados de entrada para o modelo paramétrico computacional SPECTRAL2, Figura 2. Para o cálculo da radiação UV (A+B) e IUV máximos mensais, foram considerados os dias julianos médios de cada mês e conforme esses dias foram determinados os índices de ozônio por meio dos dados do satélite TOM'S, considerando a média de três últimos anos.

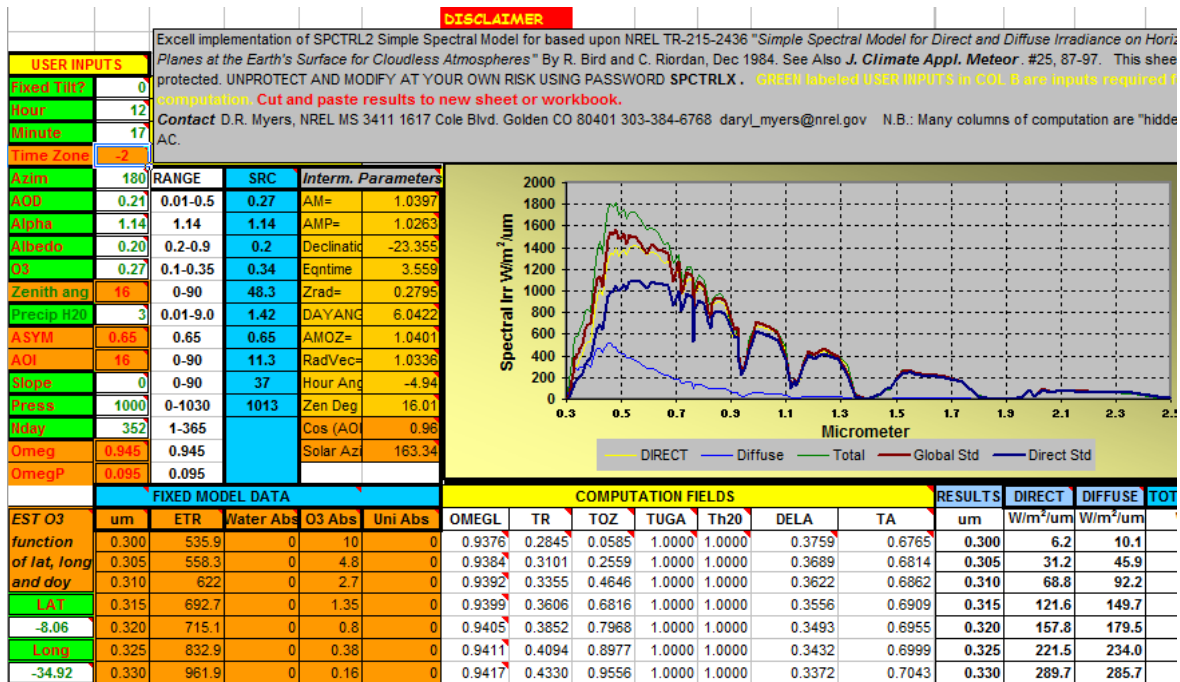


Figura 2: Área de trabalho do SPECTRAL2

As radiações UV(A+B) máximas foram calculados para as 8 localidades e para cada mês. O IUV máximo foi determinado conforme as seguintes expressões:

$$I_{UV} = K_{\lambda} \int_{280nm}^{400nm} I_{\lambda} S_{\lambda} d\lambda \quad (5)$$

onde,

K_{λ} é uma constante igual $40 \text{ m}^2/\text{W}$

S_{λ} é espectro de ação para eritema, dado:

$$S_{\lambda}(\lambda) = 1 \rightarrow 250nm < \lambda < 298nm \quad (6)$$

$$S_{\lambda}(\lambda) = 10^{0.094(298-\lambda)} \rightarrow 298nm < \lambda < 328nm \quad (7)$$

$$S_{\lambda}(\lambda) = 10^{0.015(139-\lambda)} \rightarrow 328nm < \lambda < 400nm \quad (8)$$

Os resultados de radiação UV (A+B), obtidos através do SPECTRAL2 foram comparados com os dados experimentais disponíveis e com um modelo para estimativa da radiação UV (A+B), desenvolvido anteriormente para cidade de Pesqueira (Leal et. al., 2009). Este modelo foi gerado a partir de regressões múltiplas do índice de transmitância atmosférico ultravioleta $\langle K_{TUV} \rangle$ em função da massa de ar $\langle m \rangle$ e do índice de transmitância atmosférico K_T .

$$K_{TUV} = A.K_T^B.m^{-C} \quad (9)$$

onde,

K_T e K_{TUV} são respectivamente, é o índice de transmitância da radiação global diário e ultravioleta.

$$K_T = \frac{H_G}{H_0} \quad (10)$$

$$K_{TUV} = \frac{H_{UV}}{H_{UV0}} \quad (11)$$

sendo,

H_G é a radiação solar global diária na superfície terrestre.

H_0 é a radiação solar global diária extraterrestre

K_{TUV} é o índice de transmitância ultravioleta diário ($K_{TUV} = H_{UV}/H_{UV0}$)

m é a massa de ar ao meio dia solar

$$H_{0UV} = \frac{24}{\pi} I_{SC}(UV) E_0 \left[\cos \delta \cos \Phi \cos \omega_s + \frac{\pi}{180} \omega_s \text{sen} \delta \text{sen} \Phi \right] \quad (12)$$

onde, $I_{SC}(uv) = 80,83 \text{ W m}^{-2}$

E_0 é a distância relativa Sol-Terra

ϕ é a latitude local

δ é a declinação

ω_s é o ângulo do nascer ou por do Sol

Como resultado das regressões múltiplas, utilizando dados atuais (2010), foi obtida a seguinte expressão para a cidade de Pesqueira e regiões circunvizinhas:

$$\langle K_{TUV} \rangle = 0.797 K_T^{0.801} m_r^{0.374} \quad (13)$$

Foi também feita uma comparação entre os IUV estimados pelo SPECTRAL2 com os dados medidos pela estação Recife mediante o uso de um biômetro do modelo 501 UV-B do fabricante Solar Light. Os indicadores estatísticos utilizados foram o MBE% (mean bias error) e RMSE% (root mean square error):

$$MBE = 100 \frac{\sum_n (H_{UV,calculado} - H_{UV,medido})}{\sum_n H_{UV,medido}} \% \quad (14)$$

$$RMSE = 100 \sqrt{\frac{\sum_n (H_{UV,calculado} - H_{UV,medido})^2}{n}} \frac{1}{\sum_n \frac{H_{UV,medido}}{n}} \% \quad (15)$$

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 4 mostra os valores de radiação UV(A+B) máximos mensais calculados pelo SPECTRAL2 para o estado de Pernambuco.

Estação	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Ann
Araripina (w/m ²)	28,9	28,5	29,3	27,3	25,2	23,9	25,5	28,3	30,1	31,2	30,1	29,8	28.2
Arcoverde (w/m ²)	31,3	30,2	30,3	28,3	25,9	22,8	24,6	27,7	30,2	31,9	32,1	30,5	28.8
Caruaru (w/m ²)	30,0	28,7	29,6	27,0	24,0	21,5	22,7	25,0	27,6	29,4	30,4	29,0	27.1
Floresta (w/m ²)	29,5	29,6	30,0	26,8	24,1	21,7	23,0	26,1	28,5	29,9	29,8	29,3	27.3
Ouricuri (w/m ²)	29,0	29,4	28,9	26,5	23,6	22,0	23,7	26,8	28,6	30,2	30,3	29,5	27.4
Petrolina (w/m ²)	29,8	29,9	28,8	26,4	23,6	22,2	23,0	26,2	28,2	30,0	30,4	29,6	27.4
Recife (w/m ²)	29,0	30,2	29,4	26,1	23,3	21,4	22,4	25,3	27,8	29,5	30,0	28,5	26.9
S Talhada (w/m ²)	29,2	30,1	29,7	27,0	24,5	22,4	23,7	26,1	28,9	30,2	30,2	29,8	27.6

Tabela 4 – Valores máximos mensais da radiação UV (A+B)

Com o objetivo de comparar os resultados estimados pelo SPECTRAL2 e confirmar a sua boa precisão, os dados medidos pela estação Pesqueira, localizada a 45 km da cidade de Arcoverde, foram comparados os valores da radiação UV (A+B) estimadas pelo SPECTRAL2. Foram selecionados os valores máximos de radiação UV (A+B) de cada mês do ano de 2009. Estes dados foram obtidos pela estação Pesqueira através de um sensor TUVR (Total Ultraviolet Radiometer). Mediante uso da profundidade ótica determinada para a cidade de Arcoverde, considerando as coordenadas geográficas da cidade de Pesqueira e utilizando o SPECTRAL2, foi possível estimar a radiação UV (A+B) máxima para a cidade de Pesqueira. A Figura 3 mostra as curvas resultantes. A curva em azul é resultante do modelo gerado para a cidade de Pesqueira.

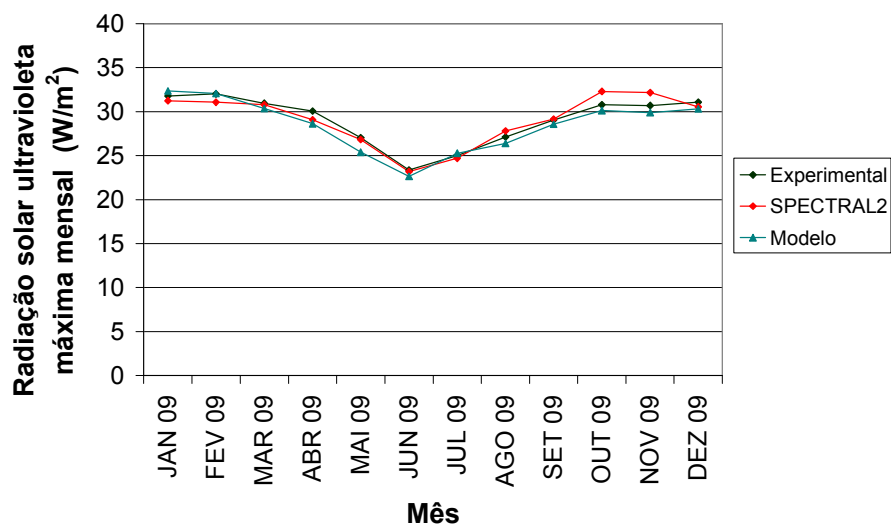


Figura 3 – Comparação entre a radiação UV (A+B) estimada pelo SPECTRAL2 e por dados experimentais para a cidade de Pesqueira.

A partir do gráfico observa-se que os níveis de radiação UV (A+B) máximos mensais ocorrem na primavera / verão (setembro a fevereiro) e mínimos no outono / inverno (março a agosto), mostrando o comportamento típico no Nordeste do Brasil. Contudo, a radiação UV (A+B) média anual mostrou-se elevada em todas as localidades e em todo o período de um ano. Os valores estimados pelo SPECTRAL2 apresentaram um MBE% = -0,016% e um RMSE% = 2,7% e o modelo um MBE% = -1,98% e um RMSE% = 2,86%, confirmando sua boa capacidade de predição, quando comparados com os dados experimentais.

A Tabela 5 mostra os índices ultravioleta máximos estimados pelo SPECTRAL2 para as diversas localidades.

Estação	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Ann
Araripina	12	13	13	12	11	10	10	12	14	14	13	13	12
Arcoverde	13	14	13	12	11	9	10	12	14	15	14	12	12
Caruaru	13	12	13	12	10	8	9	10	12	13	13	12	11
Floresta	12	13	13	12	10	9	9	11	13	14	13	12	12
Ouricuri	12	13	13	12	10	9	10	12	13	14	13	12	12
Petrolina	12	13	13	12	10	9	9	11	13	13	13	12	12
Recife	12	14	14	12	10	9	9	11	13	14	13	12	12
S Talhada	12	14	13	12	10	9	9	11	13	13	13	12	12

Tabela 5 – Valores máximos do IUV mensal.

Um processo semelhante foi feito para estimar o IUV (meio-dia) para os meses de máxima radiação UV (A+B) no ano de 2010 na cidade de Recife, Figura 4.

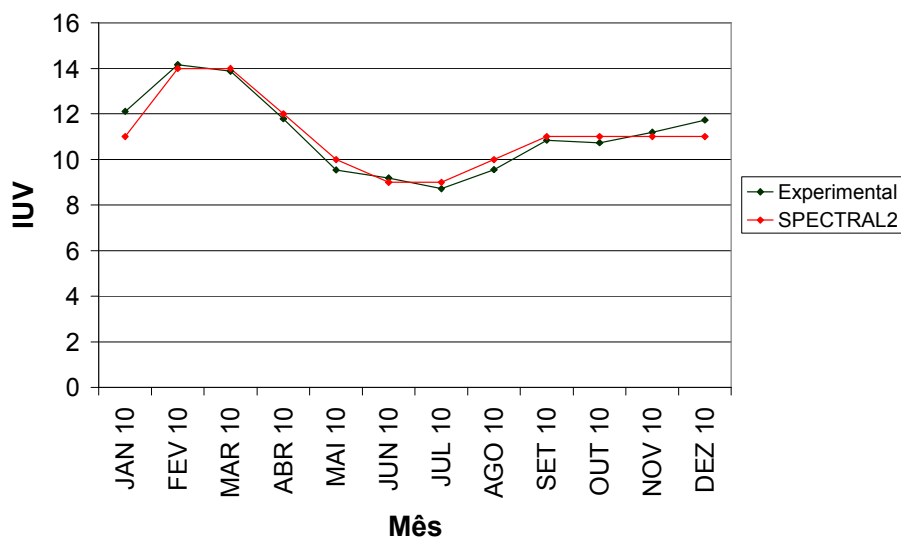


Figura 4 – Comparação entre o IUV máximo mensal estimado pelo SPECTRAL2 e por dados experimentais para a cidade de Recife.

Para a cidade de Recife os valores máximos de IUV (meio-dia) mensais ocorreram nos meses fevereiro e março, onde foram observados índices de ozônio e profundidade ótica de aerossóis com valores um pouco mais reduzidos. Os valores médios anuais mostraram um IUV extremo para todas as localidades. Os valores estimados e também comparados com os dados experimentais, apresentaram um MBE% = -2,95 %, RMSE% = 4,10 %.

CONCLUSÕES

Os níveis de radiação solar UV (A+B) máximos mensais se mostraram elevados para todos os anos no estado de Pernambuco. Valores máximos foram observados na Primavera / verão e mínimos no outono / inverno. Entre as cidades estudadas, a cidade de Arcoverde apresentou níveis de radiação superiores, quando comparadas com as demais localidades devido a sua altitude mais elevada. O IUV (meio-dia) médio anual foi extremo para todas as localidades. O SPECTRAL2 mostrou uma boa capacidade de estimativa da radiação UV (A+B) e IUV. A radiação estimada para a cidade

de Pesqueira apresentou um $MBE\% = -0,016\%$ e um $RMSE\% = 2,7\%$, quando comparada com os dados experimentais. Para estimativa do IUV mensal para a cidade Recife, foi obtido um $MBE\% = -2,95\%$, $RMSE\% = 4,10\%$. Estes resultados transmitem uma boa confiabilidade, e portanto, os valores de radiação UV (A+B) e IUV estimados podem servir de referência para elaboração de um mapa da irradiação ultravioleta, máxima mensal para o estado de Pernambuco.

REFERÊNCIAS

- Diffey, B. L. (1991). Solar ultraviolet radiation effects on biological system, pp. 299-328. Phys. Med. Bio.
- Kirchhoff, V. W. J. H.; Echer, E.; Paes Leme, N.; Silva, A. A. (2000). A variação sazonal da radiação ultravioleta solar biologicamente ativa. Brazilian Journal Geophysics 18, 1, 63-73.
- Leal, S. S.; Tiba, C.; Piacentini, R. (2009). Modelos estatísticos para determinação da irradiação solar diária no estado de Pernambuco. XXXII Reunión de Trabajo de Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente, ASADES 2009, Universidad Nacional de Río Cuarto, Río Cuarto, Argentina.
- Molineaux, B.; Ineichen, P., O'neil, N., (1998). Equivalence of pyrheliometric and monochromatic aerosol optical depths at a single key wavelength. Applied Optics 37, 7008-7018.
- Tiba, C.; Pimentel, V. M. (2009). Estimating atmospheric linke turbidity index from climatic data for Pernambuco, ISES 2009, Johannesburg, South Africa.
- Total Ozone Mapping Spectrometer – TOMS. Disponível em:
<http://jwocky.gsfc.nasa.gov>. Acessado em 05/04/2011
- World Health Organization 2002 – WHO. Global solar UV index. Disponível em:
<http://www.who.int/uv/publications/en/UVIGuide.pdf>

ABSTRACT

In 2008, aiming to collect the global radiation and UV (A+ B), two measurement stations were set up, one in the municipality of Pesqueira and the other, in the municipality of Araripina. The measurements enabled the creation of statistical models as to calculate the UV (A+ B) radiation in the neighboring regions, by means of the information of the global radiation. For the other localities the SPECTRAL2 computational parametric model was used from entry data as aerosol optical depth, pressure amongst others. The aerosol optical depth (AOD) was calculated by empirical equation relating this with Linke Turbidity Index, for air mass 2, TL_m , broadband water vapors optical depth and clean dry atmosphere. Given all the facts, it was possible to generate solar UV monthly maps (maximum) for the state of Pernambuco. This map will be important as to alert the population regarding blindness and skin cancer prevention

Keywords: Solar radiation UV; erytema action spectrum; aerosol optical depth; linke turbidity index