

ALGORITMOS PARA CÁLCULOS DE TRANSFERÊNCIA RADIATIVA NA REGIÃO ULTRAVIOLETA DO ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO

Marcelo de Paula Corrêa¹

Abstract

This work presents a summary of two computational codes recently developed for applications in radiative transfer studies in the ultraviolet spectral region. The development of a model provides the necessary knowledge concerning tools and methods related to an analyzed phenomenon. Moreover, these efforts result in more flexible tools, possibly coherent with available databases, and they are directly related to specific needs of the developer. The first model, **UVGAME** (Ultraviolet Global Atmospheric Model), was built up to high computational precision calculations, such as spectral radiances, irradiances and actinic fluxes evaluations. The second model, **2-SUM** (2-Stream UV Model), presents operational objectives like the ultraviolet index forecasts. In this case, the requirement is the computational speed in spite of a smaller precision. The first part of this paper shows the theoretical description of these computational models. The next section shows the models validation based on intercomparison among works found in the scientific literature. These tests show positive results in relation to the objectives considered to each one of the models. The last topic of the article describes 2-SUM model as a currently operational tool functioning in two important Brazilian research centers (CPTEC/INPE and IAG/USP).

Keywords: ultraviolet radiation, computational codes, discrete ordinate method, two-flux methods, radiative transfer.

Resumo

Uma resenha sobre dois códigos computacionais recentemente desenvolvidos para aplicações em estudos sobre transferência radiativa na região ultravioleta é apresentada neste trabalho. Complementar à simples utilização, o desenvolvimento de modelos permite conhecer precisamente as ferramentas e métodos utilizados para representar os fenômenos analisados. Além disso, esse tipo de esforço resulta em produtos mais flexíveis, coerentes com informações das bases de dados previamente disponíveis, e que podem atender necessidades específicas dos pesquisadores que o desenvolve. Um dos modelos aqui apresentado, **UVGAME** (*Ultraviolet Global Atmospheric Model*), é voltado à exigência de grande precisão computacional, tal como avaliações de radiancias,

¹ Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais – CPTEC/INPE
Rodovia Pres. Dutra, km 40 – Cachoeira Paulista – SP – CEP 12630-000
Fone: +55 (12) 3186-9454 Fax +55 (12) 3186-9291
e-mail: mpcorrea@cptec.inpe.br

irradiâncias e fluxos actínicos espectrais. O outro modelo, **2-SUM** (*2-Stream UV Model*), tem objetivos operacionais como a previsão do índice ultravioleta. Neste caso as exigências se concentram na velocidade computacional a despeito de certa perda na precisão. A primeira parte do artigo é voltada à descrição teórica desses modelos. A validação dos mesmos é apresentada no tópico seguinte e se baseia em trabalhos de intercomparação conhecidos na literatura. Os testes mostraram resultados positivos em relação aos objetivos propostos a cada um. O último tópico do artigo descreve a utilização do modelo 2-SUM como ferramenta operacional atualmente em funcionamento no CPTEC/INPE e no IAG/USP.

Palavras-chave: radiação ultravioleta, códigos computacionais, ordenadas discretas, métodos dois-fluxos, transferência radiativa.

INTRODUÇÃO

A radiação ultravioleta (R-UV) corresponde à cerca de 7% do total de radiação emitida pelo sol e é representada pela faixa do espectro eletromagnético entre os comprimentos de onda de 100 e 400nm ($1\text{nm} = 10^{-9}\text{m}$). Esse tipo de radiação é responsável por uma série de reações fotoquímicas que ocorrem principalmente nas regiões mais elevadas da atmosfera, agindo como catalisador de reações químicas e tendo influência marcante nos mecanismos de aquecimento dessas camadas. Quando atinge a superfície a R-UV exerce diversos tipos de efeitos sobre os seres vivos e materiais inorgânicos. Dentre esses efeitos podem ser destacados: a atenuação do crescimento de lavouras e frutos (Caldwell et al., 2003), a diminuição da produção de fitoplâncton (Häder et al., 2003), os cânceres e mutações genéticas em peixes e anfíbios (Tiegte et al., 2001), o desgaste e deterioração de tintas e polímeros (Andrady et al., 2003), dentre outros. Em especial, sobre os seres humanos a R-UV exerce uma série de efeitos nocivos, tais como: queimaduras, envelhecimento precoce, depleção do sistema imunológico, catarata e diversos tipos de cânceres de pele (Diffey, 1991). Mas, por outro lado, também exerce efeitos benéficos e essenciais à vida, como a síntese de vitamina D₃, fundamental para as funções osteoblástica e paratireóides (Webb e Holick, 1988). Quando se estudam os efeitos fotobiológicos da R-UV, é comum subdividi-la em três subintervalos: UVA: entre 320 e 400nm; UVB: entre 280 e 320nm; e UVC: entre 100 e 280nm. A R-UV do tipo C é totalmente absorvida pelo oxigênio e ozônio presentes nas camadas superiores da atmosfera. A R-UVB é fortemente absorvida pelo ozônio presente principalmente na estratosfera e atinge a superfície terrestre em quantidades muito tênues, mas suficientes para provocar os efeitos fotobiológicos anteriormente citados. Por fim, tem-se a R-UVA que é pouco absorvida pelos gases

presentes na atmosfera e atinge a superfície terrestre em maiores quantidades. Além do fenômeno de absorção, a R-UV também sofre intenso espalhamento molecular. Uma explicação simplista para esse fenômeno pode ser atribuída ao fato do espalhamento ser inversamente proporcional à quarta potência do comprimento de onda (Abhyankar, 1996).

A compreensão desses fenômenos é essencial para que métodos matemáticos e computacionais para o cálculo da radiação que atinge a superfície terrestre e/ou camadas intermediárias da atmosfera sejam desenvolvidos. Esses métodos são geralmente baseados na Equação de Transferência Radiativa (ETR), cuja solução é por vezes complexa e, de acordo com as necessidades impostas pelo estudo em questão, requer a utilização de simplificações e aproximações (ver Liou, 1980, capítulo 6). Algumas dessas simplificações se baseiam em considerações sobre a composição e as características do sistema “Terra-atmosfera”. Por exemplo, uma vez que o raio da Terra é muito maior do que a espessura da atmosfera opticamente ativa e as variações verticais são mais importantes do que aquelas que ocorrem em escala horizontal, pode-se admitir que a atmosfera tenha um formato plano-paralelo e eliminar eventuais complicações da geometria esférica. Outras simplificações se constituem de aproximações analíticas para a solução da ETR. Por exemplo, as aproximações para uma atmosfera tênue (*thin atmosphere*), a solução para espalhamento simples (*single-scatter solution*) e as várias soluções do tipo dois fluxos (*2-stream solutions*, 2F), tais como as muito difundidas *Eddington*, δ -*Eddington*, *Coakley-Chýlek*, etc. (ver King e Harshvardhan, 1986). Além dessas, não se pode deixar de citar outra solução analítica poderosa para a solução da ETR em atmosferas não-homogêneas: o Método de Ordenadas Discretas (MOD), aperfeiçoado e popularizado por Chandrasekhar (1960), que utiliza integrações gaussianas para resolução da ETR. Os códigos computacionais apresentados neste artigo são baseados nos métodos 2F e MOD. Inclui-se às suas apresentações a discussão de suas validações e a apresentação de suas aplicações presentes. Espera-se que este trabalho permita a divulgação dessas importantes ferramentas para o estudo de transferência de R-UV na atmosfera.

DESCRIÇÃO TEÓRICA

Introdução sobre os modelos de R-UV para estudos de efeitos fotobiológicos. Os efeitos fotobiológicos são um dos temas de maior relevância e popularidade nos estudos sobre R-UV. Para representar esse tipo de efeito, os modelos de R-UV precisam implementar funções espectrais da resposta biológica aos estímulos da radiação. Isto é, uma descrição da eficácia relativa de uma banda do espectro em relação a uma resposta biológica específica. No caso dos seres humanos, essa resposta é padronizada pelo espectro de ação eritêmica que representa a sensibilidade da pele à R-UV absorvida – figura 1 – (McKinlay e Diffey, 1986).

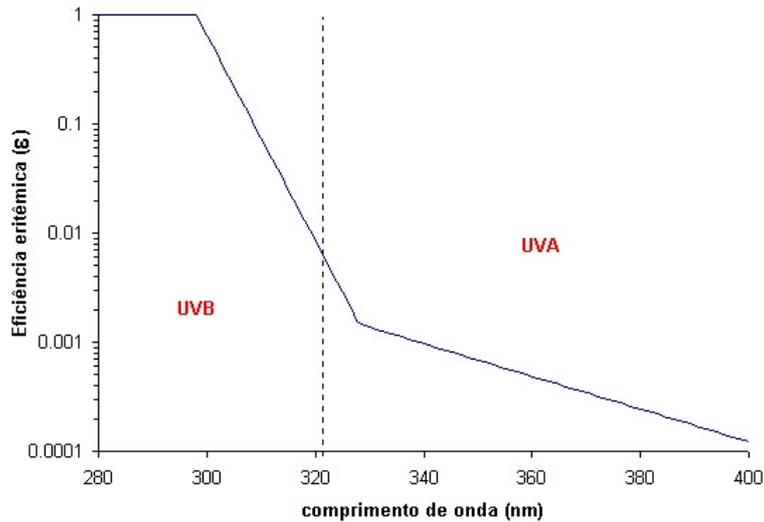


Figura 1 – Espectro de ação eritêmica (McKinlay e Diffey, 1986)

A irradiância espectral UV deve ser ponderada pelo espectro de ação, de modo a se obter a irradiância biologicamente ativa, denominada irradiância eritêmica no caso de seres humanos. Isto é:

$$S_{\lambda} = I_{\lambda} \epsilon_{\lambda} \quad [\text{Wm}^{-2}/\text{nm}] \quad (1)$$

Integrando-se a irradiância S_{λ} na região UV, tem-se:

$$S = \int_{280\text{nm}}^{400\text{nm}} I_{\lambda} \epsilon_{\lambda} d\lambda \quad [\text{Wm}^{-2}] \quad (2)$$

O índice ultravioleta (IUV) se trata de uma padronização da irradiância eritêmica através de uma escala numérica, tal que $1 \text{ IUV} = 25 \text{ mW/m}^2$ (WHO, 2002). Essa relação foi estabelecida com base nas avaliações iniciais realizadas no Canadá (primeiro país a utilizar essa escala), cuja incidência máxima de R-UV atingia, em média, valores em torno de 10. Para realizar previsões do IUV sob critérios operacionais, o modelo necessita ser alimentado com dados precisos sobre o conteúdo de ozônio, posição geográfica (latitude, longitude e altitude) e escala de tempo. Além destes, outros parâmetros como as propriedades ópticas de populações típicas de aerossóis, a nebulosidade e o tipo de superfície da região estudada também são importantes na avaliação do IUV. Na ausência dessas informações, recomenda-se a previsão do IUV para condições de céu claro (sem nuvens), presença de aerossol natural (*background*) (espessura óptica = 0,2 e albedo simples =

0,9) e refletância da superfície de 3% para ambientes urbanos, conforme recomendação da EPA (*Environmental Protection Agency*, EUA) – (Long et al., 1996; WHO, 1999).

O **UVGAME** (*Ultraviolet Global Atmospheric Model*) é um modelo computacional de espalhamento múltiplo, baseado no MOD (Stamnes et al., 1988), desenvolvido para aplicações sob diferentes condições atmosféricas, geográficas e temporais. O modelo trabalha com múltiplas camadas atmosféricas homogêneas, perfazendo um perfil vertical heterogêneo para uma atmosfera plano-paralela.

No MOD as integrações presentes na ETR são aproximadas por integrações gaussianas:

$$\int_{-1}^1 f(x)dx \approx \sum_{j=-m}^m w_j f(x_j) \quad (3)$$

Os termos $f(x_j)$ são chamados de ordenadas discretas e w_j são fatores (pesos) que ponderam a soma em j , tal que:

$$w_j = \frac{1}{P'_m(x_j)} \int_{-1}^1 \frac{P_m(x)}{x - x_j} dx, \quad (4)$$

onde x_j são as raízes (zeros) dos polinômios de Legendre $P_m(x)$. Nos estudos que envolvem transferência radiativa, só são considerados os polinômios de Legendre de grau par, já que os zeros referentes aos termos ímpares se anulam (maiores detalhes deste e de outros desenvolvimentos desse tópico podem ser encontrados em Chandrasekhar, 1960). Por essa razão:

$$w_i = w_{-i}, \quad x_{-i} = -x_i \quad (5)$$

Uma vez conhecida a integração gaussiana, verifica-se como esse processo é utilizado para simplificar a ETR. Utilizando-se um caso simplificado como o do espalhamento isotrópico conservativo (albedo simples $\omega_0 = 1$ e a função de fase $P(\cos\theta) = 1$) a ETR assume a seguinte forma:

$$\mu \frac{dI(\tau, \mu)}{d\tau} = I(\tau, \mu) - \frac{1}{2} \int_{-1}^1 I(\tau, \mu') d\mu' \quad (6)$$

Substituindo a integral em (6) pela aproximação gaussiana (3), tem-se que:

$$\mu_i \frac{dI_i}{d\tau} = I_i - \frac{1}{2} \sum_{j=-n}^n w_j I_j \quad (7)$$

A somatória de $-n$ até n se dará para cada $2n$ pontos, denominados raios de quadratura ou ângulos de Gauss (*streams*). Quanto maior o número de pontos, maior será a precisão desta restituição. No caso do UVGAME, testes de sensibilidade mostraram que a expansão em oito termos ($n = 8$) é suficientemente precisa para cálculos de irradiâncias (Corrêa, 2003), confirmando a sugestão de Box et al. (1993) para este tipo de aplicação. O desenvolvimento apresentado neste artigo é apenas um resumo simplificado do método. No entanto, seu desenvolvimento análogo é utilizado em aplicações mais complexas da ETR, como nos casos de espalhamento anisotrópico, função fonte, etc.

No UVGAME os processos de absorção e espalhamento são combinados visando obter resultados precisos próximos de condições reais, como a presença de ozônio troposférico misturado a camadas de aerossóis ou, ainda, aerossóis vulcânicos e estratosféricos misturados na camada de ozônio (Dubuisson et al. 1996). A combinação desses processos parte da hipótese de que, para uma dada característica de espalhamento e para um dado perfil de pressão e temperatura, as radiâncias espectrais dependem unicamente do número de onda por intermédio do coeficiente de absorção de referência $\mathbf{k}_v(\mathbf{z}_0)$ (Bass e Paur, 1985; Molina e Molina, 1986). Conseqüentemente, as radiâncias podem ser calculadas precisamente através da ETR para diferentes valores do parâmetro de absorção $\mathbf{k}_j(\mathbf{z}_0)$ ($j = 1, \dots, N$) distribuídos em toda região espectral. Usando valores calculados previamente por um modelo “exato” do tipo *line-by-line* (LBL), pode-se interpolar radiâncias monocromáticas aproximadas para cada valor de $\mathbf{k}_v(\mathbf{z}_0)$. Como as características de espalhamento (isto é, coeficiente de espalhamento e albedo simples) variam lentamente quando comparadas ao coeficiente de absorção, os cálculos de radiâncias e irradiâncias são válidos para grandes intervalos espectrais (comparado à resolução de um modelo LBL). Outra informação importante se refere ao tratamento dado ao espalhamento molecular, para o qual se utiliza a aproximação proposta por Fröhlich e Shaw (1980), corrigida por Young (1980).

Estudos envolvendo radiação atmosférica também dependem de uma avaliação precisa da irradiância espectral que provém do sol e atinge o topo da atmosfera ($I_{0\lambda}$). No UVGAME são utilizados valores de $I_{0\lambda}$ com resolução espectral é de 1 cm^{-1} (Kurucz, 1994). O uso de bases de dados acuradas permite que, em alta resolução o modelo realize integrações a cada 10 cm^{-1} e, em baixa resolução os cálculos sejam realizados em intervalos de 400 cm^{-1} . A posição geográfica (latitude e longitude) pode ser definida em associação com o dia e hora locais. Essas informações também podem ser implementadas diretamente a partir da posição do disco solar (cosseno da

distância zenital). O perfil atmosférico e a quantidade de constituintes presentes em cada camada podem ser selecionados a partir de informações teóricas (McClatchey et al., 1972) ou perfis reais fornecidos radiossondagens. Como a refletância da superfície é praticamente independente do comprimento de onda no espectro UV (Lenoble, 1993), é possível que o usuário selecione um valor constante para o cálculo de acordo com a superfície a ser caracterizada. Devido ao grande interesse no estudo da influência dos aerossóis sobre a R-UV, o modelo possui uma base de dados de alta resolução espectral especialmente desenvolvida para esse tipo de aplicações. Esse conjunto de informações radiométricas (albedo simples, parâmetro de assimetria, etc) foi calculado a partir da teoria Mie (Wiscombe, 1988) e de informações sobre índices de refração para diferentes populações de aerossóis sugeridas no trabalho de Hess et al. (1998). Maiores detalhes do desenvolvimento dessa base de dados podem ser vistos em Corrêa (2003).

O código computacional **2-SUM** (***Two-Stream Ultraviolet Model***) se baseia no método 2F para efetuar avaliações de irradiância, espectrais e integradas, em perfis atmosféricos compostos por múltiplas camadas independentemente homogêneas. Esse método consiste em combinar as características de refletância e transmitância de camadas subseqüentes a fim de avaliar os fluxos ou balanços de radiação em um determinado nível atmosfera. Trata-se de uma técnica simples tanto do ponto de vista matemático, quanto da implementação em um código computacional. Tomando como exemplo um ponto intermediário a duas dessas camadas, pode-se dizer que o mesmo será iluminado por fluxos vindos tanto da camada superior (camada “a”, por exemplo), como da inferior (camada “b”, por exemplo). Levando em consideração somente a iluminação proveniente do feixe direto, a refletância e a transmitância para a combinação entre essas camadas são dadas por:

$$R_{ab}(\mu_o) = R_a(\mu_o) + \bar{T}_a \left\{ \left[T_a(\mu_o) - e^{-\tau_a/\mu_o} \right] \bar{R}_b + e^{-\tau_a/\mu_o} R_b(\mu_o) \right\} / (1 - \bar{R}_a \bar{R}_b) \quad (8)$$

$$T_{ab}(\mu_o) = e^{-\tau_a/\mu_o} T_b(\mu_o) + \bar{T}_b \left\{ \left[T_a(\mu_o) - e^{-\tau_a/\mu_o} \right] + e^{-\tau_a/\mu_o} \bar{R}_a R_b(\mu_o) \right\} / (1 - \bar{R}_a \bar{R}_b) \quad (9)$$

nas quais $T(\mu_o)$, $R(\mu_o)$ são transmitâncias e refletâncias totais para radiação direta, e \bar{T} e \bar{R} representam essas grandezas calculadas para a radiação difusa. Conseqüentemente, os termos $e^{-\tau/\mu_o}$ e $T(\mu_o) - e^{-\tau/\mu_o}$ se referem, respectivamente, às transmitâncias direta e difusa para radiação direta. Todos esses termos podem ser calculados através de equações analíticas derivadas de métodos como δ -Eddington por exemplo (maiores detalhes em King e Harshvardhan, 1986).

No caso da radiação difusa, a refletividade da camada de cima, \overline{R}_{ab} , é diferente daquela cuja iluminação provém de baixo, $\overline{\overline{R}}_{ab}$, pois:

$$\overline{R}_{ab} = \overline{R}_a + \frac{\overline{T}_a \overline{R}_b \overline{T}_a}{(1 - \overline{R}_a \overline{R}_b)} \quad (10a)$$

$$\overline{\overline{R}}_{ab} = \overline{R}_{ba} = \overline{R}_b + \frac{\overline{T}_b \overline{R}_a \overline{T}_b}{(1 - \overline{R}_a \overline{R}_b)} \quad (10b)$$

Uma vez avaliadas as refletâncias e transmitâncias das camadas, é possível estimar os fluxos ascendentes e descendentes em qualquer nível da atmosfera. Considerando que o topo da atmosfera é iluminado por um feixe direto de radiação solar S_o , tem-se que o feixe ascendente em qualquer nível da atmosfera é dado por:

$$F^\uparrow = S_o \left\{ \left[T_{1,i}(\mu_o) - e^{-\tau_{1,i}/\mu_o} \right] \overline{R}_{i+1,s} + e^{-\tau_{1,i}/\mu_o} R_{i+1,s}(\mu_o) \right\} / (1 - \overline{R}_{i+1,s} \overline{\overline{R}}_{1,i}) \quad (11)$$

e o descendente:

$$F^\downarrow = S_o \left\{ e^{-\tau_{1,i}/\mu_o} + \left[T_{1,i}(\mu_o) - e^{-\tau_{1,i}/\mu_o} \right] + e^{-\tau_{1,i}/\mu_o} \overline{\overline{R}}_{1,i} R_{i+1,s}(\mu_o) \right\} / (1 - \overline{R}_{i+1,s} \overline{\overline{R}}_{1,i}) \quad (12)$$

Nas equações (11) e (12) o índice s representa o nível da superfície e $(1,i)$ e $(i+1,s)$ são, respectivamente, as regiões acima (isto é, a partir do topo da atmosfera) e abaixo (isto é, a partir da superfície) do nível desejado (figura 2). Usando as equações (9) e (10b), pode-se calcular a transmitância $T_{1,i}$ e a refletância $\overline{\overline{R}}_{1,i}$ da região sobre o nível, adicionando-se as camadas a partir do topo da atmosfera até o nível i . De maneira similar, com as equações (8) e (10a), pode-se computar a refletividade $R_{i+1,k}$ e

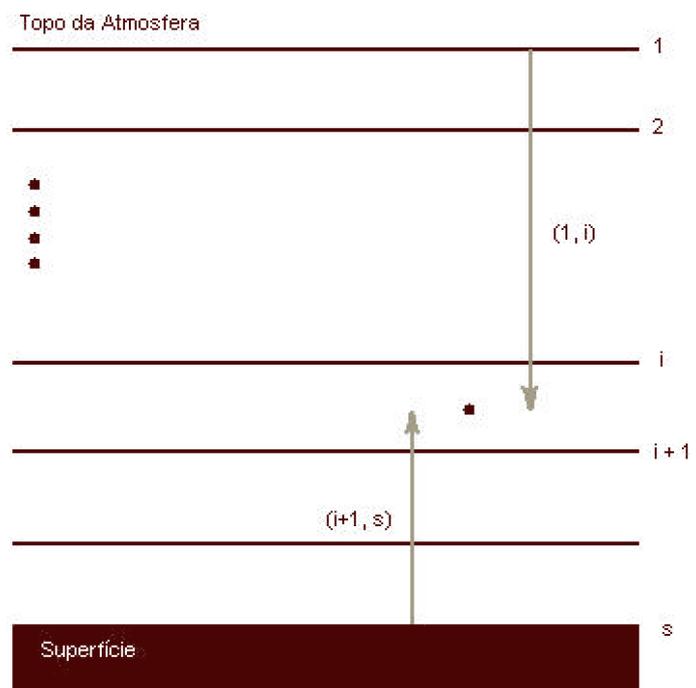


Figura 2 – camadas atmosféricas

$\overline{R}_{i+1,k}$ adicionando camadas a partir da superfície até o nível $i+1$.

UTILIZAÇÃO DOS MODELOS

Validação. A validação do modelo UVGAME apresentado neste trabalho teve como base dois estudos de intercomparação disponíveis na literatura. Por ser um código computacional robusto e de maior precisão, o UVGAME foi utilizado como código de referência para a validação do modelo 2-SUM. O estudo de Koepke et al.(1998) trata da comparação entre códigos radiativos para determinação do IUV. Nesta ocasião, foram avaliados 18 códigos radiativos especialmente desenvolvidos para cálculos na região UV, sendo seis modelos espectrais de espalhamento múltiplo, oito modelos espectrais aproximados e de grande desempenho computacional, e quatro modelos empíricos. Dois anos mais tarde, van Welle e colaboradores (2000), publicaram os resultados de uma intercomparação para cálculos espectrais de irradiâncias em superfície, envolvendo 12 diferentes códigos testados para seis diferentes condições atmosféricas.

A figura 3 mostra um histograma que representa os desvios absolutos entre os valores calculados pelo UVGAME e a média de referência sugerida no estudo de Koepke et al. (1998). No eixo horizontal os valores absolutos compreendem um desvio de $\pm 0,5$ DU. Foram realizados 106 testes sob condições geofísicas propostas na referida publicação: a.) quatro perfis de concentração total de ozônio (150, 190, 285 e 380 DU); b.) quatro posições para a posição zenital do disco solar (15° , 30° , 60° e 80°); c.) quatro albedos de superfície (0, 0.03, 0.1 e 0.5); e d.) dois níveis de superfície (nível do mar e 2000m). Além desses parâmetros, foram avaliados os impactos da

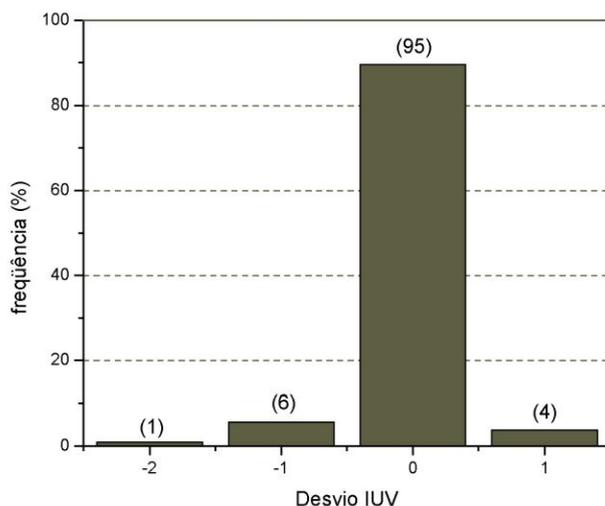


Figura 3 – Resultados do código UVGAME em relação aos propostos na comparação entre códigos para cálculo do IUV (Koepke et al., 1998)

influência do aerossol atmosférico e da presença de uma camada homogênea e estratificada de nuvens do tipo *cirrus* ($\tau_{\text{cirrus}} = 0,1$). No caso dos aerossóis foram fornecidos os pares de valores para profundidade óptica e albedos de espalhamento simples, a 340nm: (0,1; 1,00), (0,2; 1,00), (0,3; 0,98), (0,6; 0,92) e (1,5; 0,88).

Em mais de 90% das simulações, os valores obtidos apresentaram

diferenças menores que 0,5 DU em relação à média geral. Deste modo, pode-se concluir que o código UVGAME permite calcular IUV com precisão aceitável.

A validação dos cálculos espectrais do modelo UVGAME foi realizada através de comparações com cálculos efetuados com o modelo LibRadTran (<http://www.libradtran.org>), utilizado na intercomparação de vanWeele et al. (2000). Os resultados mostraram-se coerentes com a margem de erros proposta nesta intercomparação, com diferenças inferiores a 2% em comprimento de onda maiores que 320nm e menores que 5% em torno de 300nm. Neste caso, a diferença absoluta entre as radiâncias espectrais é inferior a $1,0 \text{ mW.m}^{-2}/\text{nm}$. Nas simulações realizadas procurou-se a maior aproximação possível às características dos casos propostos. No entanto, como é destacado no artigo de vanWeele e al., algumas características como métodos numéricos de integração, interpolação espectral das bases de dados, ou aproximações para a geometria planetária têm fundamental importância na propagação das diferenças observadas entre os modelos. Outros fatores como o uso de diferentes bases de dados para coeficientes de absorção do ozônio e irradiância solar no topo da atmosfera também são relevantes na análise das irradiâncias espectrais calculadas. A figura 4 ilustra a boa correlação encontrada na validação do UVGAME. Nesta simulação foram utilizadas as características do primeiro caso da intercomparação (ângulo solar zenital = $62,7^\circ$, albedo de superfície = 0,02, conteúdo total de ozônio = 318DU e perfil atmosférico de verão em latitudes médias (McClatchey et al., 1972)).

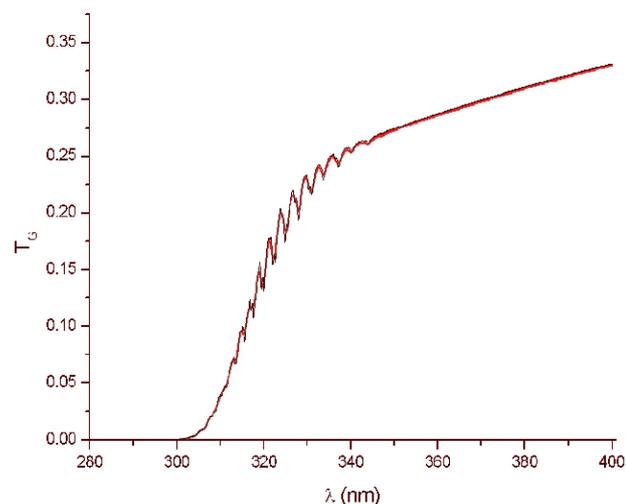


Figura 4 – Comparação de transmitâncias globais UVGAME x LibRadTran

A validação do modelo 2-SUM é restrita à avaliação do IUV para diversas condições atmosféricas, geográficas e temporais. Na figura 5, são mostradas as diferenças entre os resultados de simulações efetuadas pelos modelos UVGAME e 2-SUM para o caso de céu limpo. Deve ser destacado que, mesmo no caso de céu limpo, o modelo implementa automaticamente a presença de aerossol estratosférico de “background” (espessura óptica igual 0,2). Nas simulações foram considerados cálculos do IUV para cada dia do ano e conteúdo de ozônio constante e igual a

280DU. Os resultados mostram que o modelo 2-SUM subestima entre 0,1 e 0,35 IUV em todos os eventos simulados (note que a abscissa do gráfico apresenta valores negativos). Em termos absolutos as diferenças mais marcantes ocorrem durante o período de maior insolação (verão). No entanto, as diferenças relativas são maiores durante o inverno (-2,7%), uma vez que a elevação do sol é menor e, conseqüentemente, o caminho óptico percorrido pela radiação é maior. Neste caso, os cálculos são mais susceptíveis aos erros provenientes das múltiplas ordens de espalhamento ocorridas num caminho óptico mais extenso.

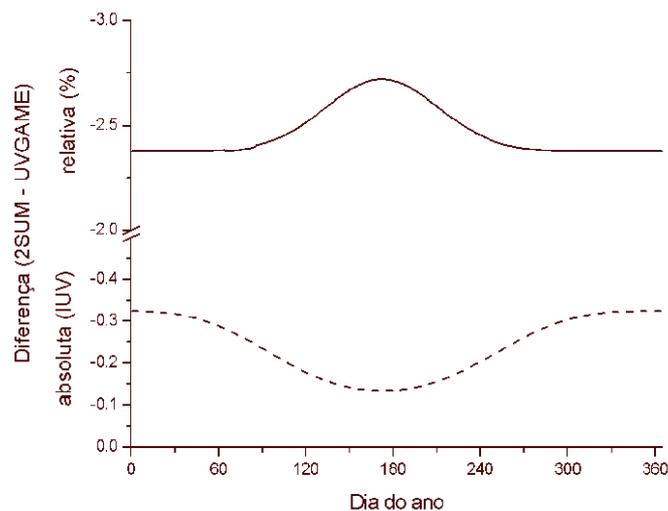


Figura 5 – comparação entre medidas dos modelos 2-SUM e UVGAME para céu claro

Na figura 6 a simulação é realizada para o caso de presença de aerossóis do tipo continental moderadamente poluído – “*continental average*” (Hess et al., 1998), típico em uma metrópole, com espessura óptica igual a 0,5. Neste caso as diferenças entre os resultados foram maiores e de sinal oposto em relação ao da simulação para céu claro. Isto é, as medidas do modelo 2-SUM são agora superestimadas em relação àquelas do modelo UVGAME. Como o método 2F tem precisão limitada na região UVB do espectro (van Weele et al., 2000), os cálculos de irradiâncias eritêmicas e do IUV, que têm forte dependência dessa região espectral, tendem a apresentar discrepâncias maiores. Os resultados superestimados podem ser atribuídos à intensificação do pico de pró-espalhamento e, portanto, das irradiâncias, devido ao uso da aproximação δ -Eddington (King e Harshvardhan, 1986). Foram observadas diferenças de até 0,5 IUV durante o verão e 0,3 IUV no inverno. Neste último período essas diferenças podem representar aproximadamente 10% do IUV calculado. Pode-se, então, concluir que o modelo 2-SUM está apto para cálculos de IUV em condições de céu claro e baixos conteúdos de aerossol. No caso de estudos específicos envolvendo esses particulados recomenda-se o uso de modelos mais robustos como o UVGAME, por exemplo. No entanto, apesar destas limitações, algumas perspectivas para a utilização do modelo 2-SUM

envolvem cálculos de balanços de fluxos e taxas de aquecimento em camadas intermediárias da atmosfera.

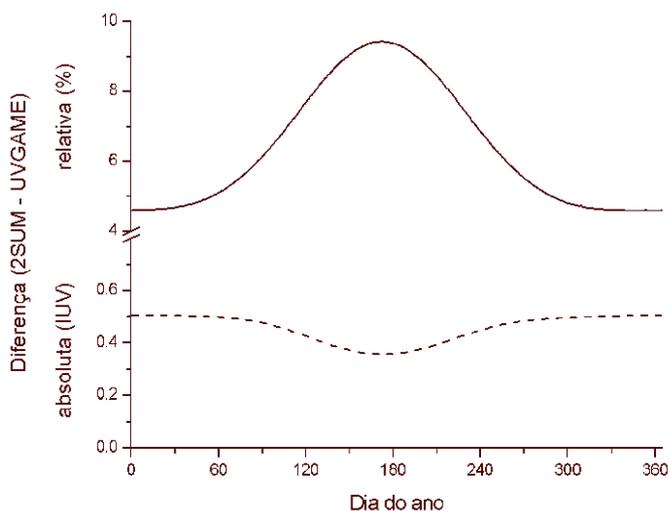


Figura 6 – comparação entre medidas dos modelos 2-SUM e UVGAME na presença de aerossol urbano moderadamente poluído

Características da aplicação operacional. Conforme mostrado nos tópicos anteriores, o modelo computacional UVGAME é uma ferramenta dirigida aos estudos que exigem cálculos mais rigorosos e resultados mais acurados. No caso do código 2-SUM, o objetivo do desenvolvimento é a eficiência computacional. Essa diminuição no tempo de processamento exige simplificação das rotinas que se reflete numa perda representativa da precisão exigida em certos tipos de estudos. De modo geral, conforme mostraram os resultados da validação, os produtos do modelo 2-SUM são suficientemente precisos para seus propósitos. Isto é, aplicações operacionais para divulgação da previsão do IUV à sociedade através dos portais *internet* do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – CPTEC/INPE (<http://satellite.cptec.inpe.br/uv>) e do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo – IAG/USP (<http://www.master.iag.usp.br/indiceuv>).

Além do IUV, também são divulgadas previsões sobre o conteúdo de ozônio, principal absorvedor da R-UV, cujas informações são provenientes de dados coletados pelos sensores TOMS/*Earth Probe* (<http://jwocky.gsfc.nasa.gov>) e SBUV-2/NOAA (<http://www.cpc.ncep.noaa.gov>). As estimativas do conteúdo total desse gás por ambos sensores são baseadas nas medidas de radiação retro-espalhada em diferentes bandas espectrais da região UV. As estimativas para a coluna de ozônio são realizadas de forma estatística (Long et al., 1996) a partir: a.) das medidas fornecidas pelos sensores; b.) das tendências do geopotencial, em 500hPa e 100hPa e; c.) da temperatura da camada em 50 hPa. A previsão em função dos campos de geopotencial e

temperatura se deve ao fato do campo de ozônio ter correlação positiva com o campo de temperatura em 50 hPa (T_{50}) e, em menor grau, correlação negativa com os campos de altura geopotencial nos dois níveis indicados (Z_{500} e Z_{100}). A partir dessas informações, a previsão do total de ozônio é dada pela relação:

$$O_3(t+1) = O_3(t-1) + \Delta O_3 \quad (13)$$

Isto é, o conteúdo de ozônio previsto para “amanhã” ($t+1$) é a quantidade de ozônio medida “ontem” ($t-1$) incrementada por uma variação (tendência). Esta variação, que depende do geopotencial e da temperatura, é dada por:

$$\Delta O_3 = a\Delta Z_{500} + b\Delta Z_{100} + c\Delta T_{50}, \quad (14)$$

na qual os coeficientes de regressão **a**, **b** e **c** são dados por:

$$a \approx \frac{\delta O_3}{\delta Z_{500}}, \quad b \approx \frac{\delta O_3}{\delta Z_{100}}, \quad c \approx \frac{\delta O_3}{\delta T_{50}} \quad (15)$$

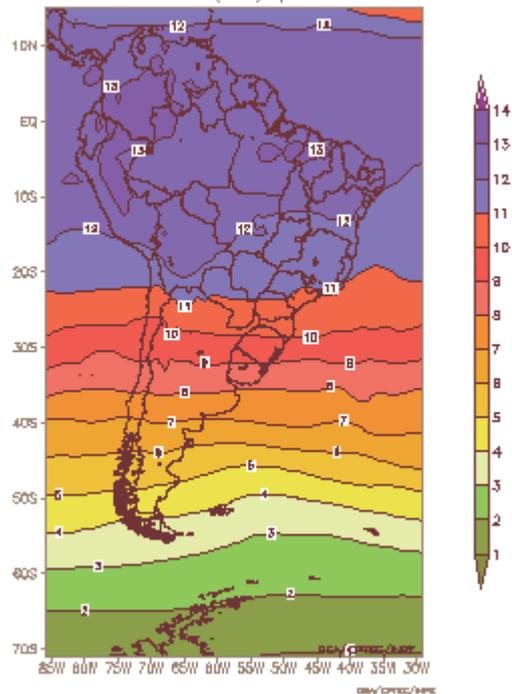
Nas relações (14) e (15) os termos precedidos por Δ representam as variações entre o dia de “ontem” ($t-1$) e a previsão para “amanhã” ($t+1$). Os precedidos por δ representam a variação entre os dias ($t-2$) – “anteontem” – e, ($t-1$) – “ontem”.

Alguns problemas relacionados à ausência de dados podem ocorrer eventualmente. Como o conteúdo de ozônio possui uma variação predominantemente latitudinal, a questão pode ser resolvida por meio de interpolações entre os valores medidos em localidades próximas. Outro problema é a presença de variações muito pequenas na temperatura ou no geopotencial. Neste caso, as diferenças tendem a zero e os termos da equação (15) se tornam muito grandes, acarretando uma estimativa exagerada e irreal para a quantidade de ozônio. Por este motivo os valores estimados a partir do método proposto são sempre comparados com o conteúdo de ozônio do dia anterior. Como a análise do comportamento diário da coluna de ozônio mostra que grandes variações no conteúdo deste elemento só são notadas em escala sazonal (Agulló, 1995), pode-se estabelecer que o valor previsto pelo método estatístico só deve ser considerado quando não ultrapassar uma diferença de $\pm 5\%$ em relação ao dia anterior (Deve-se ressaltar que Long et al. (1996) sugerem erros de até 7% na previsão do conteúdo de ozônio). Caso a previsão esteja fora desse intervalo, o conteúdo de ozônio é considerado persistente e terá o mesmo valor do dia precedente.

O modelo 2-SUM trabalha com uma grade de 1° de resolução, na região que compreende a América do Sul e parte da Antártida (entre 15°N e 70°S; 85°W e 30°W). Diariamente são fornecidas previsões do IUV para céu claro e do conteúdo de ozônio dos próximos cinco dias para todas as cidades do Brasil. Saídas gráficas permitem a visualização desses dados para diferentes regiões do País e do continente sul-americano, conforme mostra o exemplo na figura 7

a.

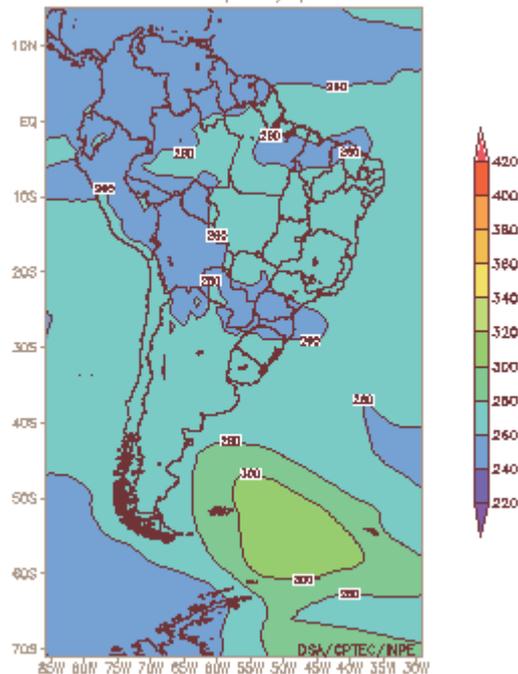
Índice Ultravioleta (IUV) para 10MAR2004



a – índice ultravioleta

b.

Conteúdo de Ozônio (D.U.) para 10MAR2004



b – conteúdo total de ozônio

Figuras 7– saídas gráficas fornecidas pelo CPTEC/INPE e Master/IAG/USP (setor América do Sul – completo)

O serviço não se restringe somente à divulgação das previsões, mas também à interpretação das mesmas. Além disso, são oferecidas informações relevantes à saúde pública como a proteção ao excesso de exposição ao sol, efeitos da R-UV sobre o ser humano, camada de ozônio, dentre outras. Os conteúdos dos textos auxiliares foram avaliados por um profissional da saúde e as diagramações dos gráficos e figuras seguem a padronização recomendada pela Organização Mundial de Saúde (WHO, 2002).

CONCLUSÃO

Neste trabalho foram apresentados os testes de validação e a descrição teórica de duas ferramentas úteis para pesquisas sobre transferência radiativa na região UV: o modelo **UVGAME**, baseado no MOD, voltado para cálculos que exijam grande precisão computacional; e o modelo **2-SUM**, baseado no método de dois fluxos, utilizado para rotinas operacionais de avaliação de irradiancias integradas UV e do Índice Ultravioleta. A validade de ambos modelos foi atestada de

acordo com os objetivos propostos para a utilização de cada um deles. O artigo também faz uma breve descrição do funcionamento operacional do modelo 2-SUM na divulgação da previsão do IUV. Essas previsões podem ser acessadas diariamente nos endereços <http://www.cptec.inpe.br/ultravioleta> (no CPTEC/INPE) e <http://master.iag.usp.br/indiceuv> (no IAG/USP).

AGRADECIMENTOS

O autor gostaria de agradecer aos Drs. Artemio Plana-Fattori e Pedro Leite da Silva Dias pelo encorajamento e apoio incessantes durante toda realização deste trabalho. Aos Drs. Luiz Augusto Machado e Juan Carlos Ceballos pelo apoio e pelo crédito nesta nova etapa na pesquisa sobre R-UV. Aos técnicos da DSA e DOP (CPTEC/INPE) e do Master (IAG/USP) pela inestimável ajuda para implementar a operação da página *internet*. E, ao Dr. Carlos Frederico de Angelis pela revisão do texto em língua inglesa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abhyankar, K.D. Hundred and twenty five years of Rayleigh scattering in the study of the planetary atmospheres. *Q. J. Roy. Astron. Soc.*, 37, 281-295, 1996.
- Agulló, E.C. **Estudio del comportamiento del ozono troposférico en el observatorio de Izaña (Tenerife) y su relación con la dinámica atmosférica**. Tesis Doctoral, Facultad de Ciências Físicas, Universidad Complutense de Madrid, 1995.
- Andradý, A.L., H.S. Hamid e A. Torikai. Effects of climate change and UV-B on materials. *Photochem. Photobiol. Sci.*, 2, 68-72, 2003.
- Box, M.A., T. Trautmann e P.E. Loughlin. Quadrature effects on the accuracy of flux calculations in realistic atmospheres. *J. Quant. Spectrosc. Ra.*, 50(6), 647-654, 1993.
- Caldwell, M.M., C.L. Ballaré, J.F. Bornman, S.D. Flint, L.O. Björn, A.H. Teramura, G. Kulandaivelu e M. Tevini. Terrestrial ecosystems, increased solar ultraviolet radiation and interactions with other climatic change factors. *Photochem. Photobiol. Sci.*, 2, 29-38, 2003.
- Chandrasekhar, S. **Radiative Transfer**. Dover Publications Inc., 393 p., 1960.
- Corrêa, M.P. **Índice ultravioleta: avaliações e aplicações**. Tese (Doutorado em Ciências) – Departamento de Ciências Atmosféricas, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, 247p., 2003.
- Diffey, B.L. Solar ultraviolet radiation effects on biological systems. *Phys. Med. Biol.*, 36(3), 299-328, 1991.

- Dubuisson, P., J.C. Buriez e Y. Fouquart. High spectral resolution solar radiative transfer in absorbing and scattering media: application to the satellite simulation. *J. Quant. Spectrosc. Ra.*, V.55, N.1, 103-126, 1996.
- Fröhlich C. e G.E. Shaw. New determination of Rayleigh scattering in the terrestrial atmosphere. *Appl. Opt.*, 19(11), 1773-1775, 1980.
- Häder, D.P., H.D. Kumar, R.C. Smith e R.C. Worrest. Aquatic ecosystems: effects of solar ultraviolet radiation and interactions with other climatic change factors. *Photochem. Photobiol. Sci.*, 2, 39-50, 2003.
- Hess, M., P. Koepke e I. Schult. Optical properties of aerosols and clouds: the software package OPAC. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 79(5), 831-844, 1998.
- King, M.D. e Harshvardhan. Comparative accuracy of selected multiple scattering approximations. *J. Atmos. Sci.*, 43(8), 784-801, 1986.
- Koepke, P., A. Bais, D. Balis, M. Buchwitz, H. Backer, X. Cabo, P. Eckert, P. Eriksen, D. Gillotay, A. Heikkilä, T. Koskela, B. Lapeta, Z. Litynska, J. Lorente, B. Mayer, A. Renaud, A. Ruggaber, G. Schauburger, G. Seckmeyer, P. Seifert, A. Schmalwieser, H. Schwander, K. Vanicek e M. Weber. Comparison of models used for UV Index calculations. *Photochem. Photobiol.*, 67(6), 657-662, 1998.
- Kurucz, R.L., Synthetic infrared spectra, in *Infrared Solar Physics CA* (Proceedings of the 154th Symposium of the International Astronomical Union, CA held in Tucson, Arizona, USA, March 2-6, 1992)}, D.M. Rabin, J.T. Jefferies, CA and C. Lindsey, Eds., Kluwer Academic Publishers, 523-531, 1994.
- Lenoble, J. **Atmospheric radiative transfer**. A. Deepak Publishing, 532 p., 1993.
- Long, C.S., A.J. Miller, H. Lee, J.D. Wild, R.C. Przywarty e D. Hufford. Ultraviolet index forecasts issued by the national weather service. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 77(4), 729-748, 1996.
- Liou, K. N. **An introduction to atmospheric radiation**. Academic Press Inc., 392 p., 1980.
- Mc Clatchey, R.A., R.W. Fenn, J.E.A. Selby, F.E. Volz e J.S. Garing. *Optical properties of the atmosphere* (Third Edition). Publ. AFCRL-72-0497, Air Force Cambridge Res. Lab., Hanscom, 1972.
- Mc Kinlay, A.F. e B.L. Diffey. A reference spectrum for ultraviolet induced erythema in human skin. *CIE J.*, 6(1), 17-22, 1987.
- Molina, L.T. e M.J. Molina. Absolute absorption cross section of ozone in the 185 to 350nm wavelength range. *J. Geophys. Res.*. **95(D13)**, 14501–14508, 1986.

- Tiegte, J.E., S.A. Diamond, G.T. Ankley, D.L DeFoe, G.W. Holcombe, K.M. Jensen, S.J. Degitz, G.E. Elonen e E. Hammer. Ambient solar UV radiation causes mortality in larvae of three species of rana under controlled exposure conditions. *Photochem. Photobiol.*, 74(2), 2001.
- Webb A.R. e M. F. Holick. The role of sunlight in the cutaneous production of vitamin D3. *Annu. Rev. Nutr.*, 8, 375-99, 1988
- WHO – World Health Organization. Fact sheet n° 227 – Agosto, 1999. Disponível na internet através do endereço: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs227/en/>
- WHO – World Health Organization. **Global solar UV index: A practical guide.** WHO/SDE/OEH/02.2, Genebra, Suíça, 28p., 2002.