

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**ESTUDO DA RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA NA CIDADE DE NATAL-RN**

**FRANCISCO RAIMUNDO DA SILVA**

**Orientador: Prof. George Santos Marinho**

Dissertação de Mestrado apresentada à  
Universidade Federal do Rio Grande do Norte  
como parte dos requisitos para Obtenção do  
Título de Mestre em Engenharia Mecânica.  
(Área de Concentração: Termociências)

NATAL, RN

JULHO 2008

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**ESTUDO DA RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA NA CIDADE DE NATAL-RN**

Dissertação submetida à Universidade Federal  
do Rio Grande do Norte como parte dos  
requisitos para obtenção do grau de Mestre em  
Engenharia Mecânica

**FRANCISCO RAIMUNDO DA SILVA**

**Orientador: George Santos Marinho**

Divisão de Serviços Técnicos

Catálogo da Publicação na Fonte. UFRN / Biblioteca Central Zila Mamede

Silva, Francisco Raimundo.

Estudo da radiação ultravioleta na Cidade de Natal-RN / Francisco Raimundo da Silva. – Natal, RN, 2008.

74 f. : il.

Orientador: George Santos Marinho.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

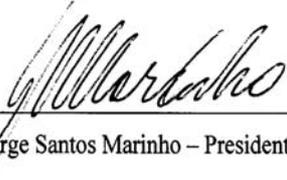
1. Radiação ultravioleta – Cidade de Natal (RN) – Dissertação. 2. Radiômetro – Dissertação. 3. Dose Eritêmica – Dissertação. 4. Saúde pública – Dissertação. I. Marinho, George Santos. II. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 52-74/-77(043.3)

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, sendo aprovada em sua forma final.

BANCA EXAMINADORA



---

Dr. George Santos Marinho – Presidente – Dpto. Eng. Mecânica - UFRN



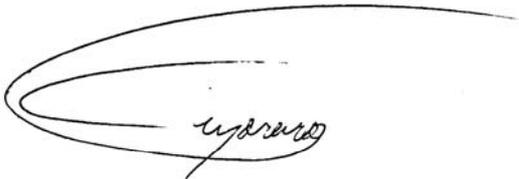
---

Dr. Aldomar Pedrini – Co-Orientador – Dpto. Arquitetura – UFRN



---

Dra. Neusa Maria Paes Leme – Examinadora Externa – INPE – SJC



---

Dr. Fernando Moreira da Silva – Dpto. Geografia – UFRN

A Deus e aos meus pais (*in memoriam*) pela  
razão da minha existência.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Prof. George Marinho, pela orientação, paciência e por ser parte da minha formação profissional;

À minha família, pela confiança e fé em tudo que me disponho a fazer;

Aos amigos Aldomar Pedrini e Eugênio Medeiros (Departamento de Arquitetura - UFRN), pela ajuda e incentivo ao longo desta pesquisa;

Ao amigo Robival Alves, pela valiosa ajuda no tratamento estatístico dos dados;

Ao Hugo Sérgio e Nicholas Bastos (bolsistas do LAVAT), pela elaboração de planilhas e gráficos;

Aos amigos e colegas do INPE-RN que estiveram comigo ao longo desta caminhada;

À Dra. Neusa Paes Leme, pela disponibilização do banco de dados do Laboratório de Ozônio do INPE-SP;

Aos colegas e professores do Laboratório de Conforto Ambiental e do Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da UFRN.

## RESUMO

Estudaram-se a variação da radiação ultravioleta (RUV) solar em quatro comprimentos de ondas (305 nm, 320 nm, 340 nm e 380 nm) e a dose eritêmica, medidas em Natal – RN – Brasil, no período de janeiro de 2001 a dezembro de 2007, empregando-se o radiômetro GUV (Ground Ultraviolet Radiometer), pertencente ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais / Centro Regional do Nordeste – INPE-CRN, instalado no teto do Laboratório de Variáveis Ambientais Tropicais – LAVAT-INPE-CRN. Verificou-se que nos meses de outubro e novembro os índices médios de RUV na cidade atingem a categoria “ALTO” antes das 09h00 e “MUITO ALTO” antes das 09h40min; também foi verificado que, exceto nos meses de junho e julho, em todos os outros meses do ano os índices atingem a categoria “ALTO” antes das 10h00, contradizendo recomendações divulgadas na mídia sobre o horário adequado para permanência em praias da cidade. Após as 14h30, os índices atingem a categoria “MODERADO” em qualquer mês do ano. Essas constatações se aplicam a todos os anos considerados na pesquisa. Dentro do período considerado na pesquisa, o ano de 2004 foi o que apresentou menores valores médios do IUV, enquanto em 2007 foram medidos os maiores valores médios. Comprovou-se, através da análise de variância (ANOVA), a variação nos quatro comprimentos de ondas e na dose eritêmica. Tendo em vista que a cidade detém elevados índices de câncer de pele e de catarata, os resultados da pesquisa podem servir de fonte de informação para estudos que visem dar subsídios a programas de saúde pública. Da mesma forma, o estudo é passível de aplicações concernentes à ciência dos materiais e à agricultura.

Palavras-chave: Radiação ultravioleta. Radiômetro. Dose Eritêmica. Saúde pública.

## ABSTRACT

There were studied the variation of the solar ultraviolet radiation (UVR) in four wavelengths (305 nm, 320 nm, 340 nm e 380 nm) and erythemic dose, measured in Natal – RN – Brazil, from January 2001 until December 2007, using the ground ultraviolet radiometer of the Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais / Centro Regional do Nordeste – INPE-CRN, fixed on the roof of the Laboratório de Variáveis Ambientais Tropicais – LAVAT-INPE-CRN. It was verified that the mean value of the UVR in the city reaches the “HIGH” index before 09h00 a.m. and “VERY HIGH” before 09h40 a.m.; it was also verified that, except in the months of June and July, in the other months of the year the UVR reaches the “HIGH” index before 10h00 a.m., despite of the recommendations broadcasting in the media about the safe time to people stay ashore on the beaches of the city. After 14h30 p.m., the UVR reaches the “MODERATE” index in any month of the year. These evidence are valid to all years of the period studied, i.e., 2001 to 2007. The year of 2004 presented the lower mean values of UVR indices, and the year of 2007 presented the higher mean values of UVR index. It was prove, by means of the analysis of variance (ANOVA), the variation in the four wavelengths and in the erythemic dose. Considering that the city has high indices of skin cancer and cataract, the results of the research may be use as a data source to studies that intend to support programs of public health. At the same time, the results of the research may be applied to material science and agriculture studies.

Key-words: Ultraviolet radiation. Radiometer. Erythemic dose. Public health.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b><i>Introdução</i></b> .....	<b>15</b>
1.1	Objetivo geral.....	17
1.2	Objetivos específicos.....	17
<b>2</b>	<b><i>Revisão bibliográfica</i></b> .....	<b>18</b>
2.1	A Radiação Solar.....	18
2.2	A atmosfera terrestre.....	21
2.3	Interação atmosfera - radiação.....	23
2.4	Atmosfera e vida.....	24
2.5	Radiação Ultravioleta e Ozônio.....	26
2.6	Efeitos da RUV nos Seres Vivos.....	28
2.7	Radiação Ultravioleta.....	36
2.8	Efeitos da RUV nos Materiais.....	37
<b>3</b>	<b><i>Metodologia</i></b> .....	<b>38</b>
3.1	População alvo do estudo.....	38
3.2	Universo de Estudo.....	39
3.3	Instrumentação.....	39
3.4	Procedimentos de Coleta de dados.....	41
3.5	Tratamento estatístico.....	41
3.6	Demonstrativo da Análise de Variância (ANOVA).....	42
<b>4</b>	<b><i>Resultados e Análises</i></b> .....	<b>45</b>
<b>5</b>	<b><i>Conclusões e Sugestões</i></b> .....	<b>63</b>
5.1	Conclusões.....	63
5.2	Sugestões.....	65
<b>6</b>	<b><i>Referências bibliográficas</i></b> .....	<b>66</b>
<b>7</b>	<b><i>Anexos</i></b> .....	<b>70</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1: Comparação entre radiação solar e corpo negro (Brasseur e Solomon, 1986).....	20
Figura 2-2: Estrutura vertical da atmosfera terrestre (valores médios). Fonte: Vianello, 2000	22
Figura 2-3: Espectro de Ação de Eritema proposto por McKinlay e Diffey (1987). .....	31
Figura 2-4: Tempos máximos de exposição para índices de UV-B .....	34
Figura 2-5: Comparativo do Índice UV em função da latitude geográfica. ....	35
Figura 2-6: Câmara de ultravioleta, instalada no Lab. de Transferência de Calor – UFRN. ...	37
Figura 3-1: Representação da localização da cidade de Natal-RN–Brasil. ....	39
Figura 3-2: Sensor do GUV instalado no teto do LAVAT-INPE-RN.....	40
Figura 3-3: Calibração de GUVs no Laboratório de Ozônio, INPE – S.J.Campos – SP. ....	40
Figura 3-4: GUV do LAVAT-INPE-CRN. ....	41
Figura 4-1: Variação da intensidade da RUV para $\lambda = 305$ nm entre 01/2001 e 12/2007. ....	45
Figura 4-2: Variação da intensidade da RUV para $\lambda = 320$ nm entre 01/2001 e 12/2007 .....	46
Figura 4-3: Variação da intensidade da RUV para $\lambda = 340$ nm entre 01/2001 e 12/2007. ....	47
Figura 4-4: Variação da intensidade da RUV para $\lambda = 380$ nm entre 01/2001 e 12/2007. ....	48
Figura 4-5: Variação do IUV entre 01/2001 e 12/2007.....	49
Figura 4-6: Média dos máximos mensais da RUV em $\lambda = 305$ nm entre 01/2001 e 12/2007 .	50
Figura 4-7: Média dos máximos mensais da RUV em $\lambda = 320$ nm entre 01/2001 e 12/2007 .	50
Figura 4-8: Média dos máximos mensais da RUV em $\lambda = 340$ nm entre 01/2001 e 12/2007 .	51
Figura 4-9: Média dos máximos mensais da RUV em $\lambda = 380$ nm entre 01/2001 e 12/2007 .	51
Figura 4-10: Médias dos máximos mensais do IUV entre 01/2001 e 12/2007 .....	52
Figura 4-11: Médias horárias da RUV em $\lambda = 305$ nm entre 01/2001 e 12/2007.....	52
Figura 4-12: Médias horárias da RUV em $\lambda = 320$ nm entre 01/2001 e 12/2007.....	53
Figura 4-13: Médias horárias da RUV em $\lambda = 340$ nm entre 01/2001 e 12/2007.....	53
Figura 4-14: Médias horárias da RUV em $\lambda = 380$ nm entre 01/2001 e 12/2007.....	53

Figura 4-15: Médias horárias da RUV para todos os comprimentos de ondas analisados na pesquisa, para um dia típico, sem nuvens.....	54
Figura 4-16: Médias horárias da Dose entre 01/2001 e 12/2007.....	55
Figura 4-17: Gráfico do índice de UV com média horárias anuais em função da hora local de janeiro de 2001 a dezembro de 2007 .....	55
Figura 4-18: Médias horárias mensais do IUV em Natal-RN entre 01/2001 e 12/2007. ....	56
Figura 4-19: Gráfico comparativo do canal 305 nm – ozônio - umidade relativa do ar. ....	57
Figura 4-20: Gráfico comparativo do canal 320 nm – ozônio - umidade relativa do ar. ....	58
Figura 4-21: Gráfico comparativo do canal 340 nm – ozônio - umidade relativa do ar. ....	59
Figura 4-22: Gráfico comparativo do canal 340 nm – ozônio - umidade relativa do ar. ....	60
Figura 4-23: Gráfico comparativo do Índice de UV – ozônio - umidade relativa do ar. ....	61

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1: Distribuição da energia solar na Terra .....	23
Tabela 2-2: Fotótipos da pele humana.....	33
Tabela 2-3:-Categorias e índices de UV-B.....	33
Tabela 2-4: Índices de UV-B e tempo de exposição para causar queimaduras.....	33
Tabela 3-1: Planilha demonstrativa da Análise de Variação para $\lambda = 305$ nm. ....	42
Tabela 3-2: Resumo da Análise de Variância (ANOVA) .....	42
Tabela 3-3: Resultados dos cálculos da ANOVA para o canal 305 nm.....	43
Tabela 4-1 Análise de variância com médias anuais de 01/2001 a 12/2007 para $\lambda = 305$ nm.	45
Tabela 4-2: Análise de variância com médias dos máximos anuais de 01/2001 a 12/2007 para $\lambda = 320$ nm.....	46
Tabela 4-3: Análise de variância com médias dos máximos anuais de 01/2001 a 12/2007 para $\lambda = 340$ nm.....	47
Tabela 4-4: Análise de variância com médias dos máximos anuais de 01/2001 a 12/2007 para $\lambda = 380$ nm.....	48
Tabela 4-5: Análise de variância com médias dos máximos anuais de 01/2001 a 12/2007 para dose.....	49
Tabela 7-1: Amostras válidas analisadas no período de janeiro/2001 a dezembro/2007.....	70
Tabela 7-2: Médias dos máximos anuais do canal de 305 nm desde janeiro/2001 a dezembro/2007 .....	70
Tabela 7-3: Médias dos máximos anuais do canal de 320 nm desde janeiro/2001 a dezembro/2007 .....	70
Tabela 7-4: Médias dos máximos anuais do canal 340 nm desde janeiro/2001 a dezembro/2007 .....	70
Tabela 7-5: Médias dos máximos anuais do canal 380 nm desde janeiro/2001 a dezembro/2007 .....	71
Tabela 7-6: Médias dos máximos anuais do Índice UV no período de janeiro/2001 a dezembro/2007 .....	71

Tabela 7-7: Média mensal do canal 305 nm no período de janeiro/2001 a dezembro/2007....	71
Tabela 7-8: Média mensal do canal 320 nm no período de janeiro/2001 a dezembro/2007....	72
Tabela 7-9: Média mensal do canal 340 nm no período de janeiro/2001 a dezembro/2007....	72
Tabela 7-10: Média mensal do canal 380 nm no período de janeiro/2001 a dezembro/2007..	73
Tabela 7-11: Média mensal da Dose eritêmica no período de janeiro/2001 a dezembro/2007	73
Tabela 7-12: Distribuição de Fisher –Snedecor .....	74

## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

AIHW	Australian Institute of Health and Welfare, Instituto Australiano de Saúde e Bem Estar.
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CRN	Centro Regional do Nordeste
Dose	Dose de RUV ( $J/m^2$ )
DU/UD	Dobson Unit, Unidade Dobson $\rightarrow 1 \text{ DU} = 2,69 \times 10^{19} \text{ mol/cm}^2$
EPA	Environmental Protection Agency, Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos da América do Norte
FPS	Fator de proteção solar
GUV	Ground Ultraviolet Radiometer, Radiômetro Ultravioleta de Superfície
ICC/CIE	International Commission on Illumination - Comissão Internacional de Iluminação
INCA	Instituto Nacional do Câncer
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Irradiância	Quantidade de Radiação incidente por unidade de área, tempo e comprimento de onda sobre uma superfície = $\mu W \text{cm}^{-2} \text{nm}^{-1}$
IUV/UVI	Índice ultravioleta, ultraviolet Index
k	Quantidade de anos $\rightarrow$ variância
K	Temperatura (Kelvin)
LAVAT	Laboratório de Variáveis Ambientais Tropicais
n	Número de amostras $\rightarrow$ variância
nm	Unidade de comprimento de onda que equivale a $10^{-9} \text{ m}$
NSF	National Science Foundation, Fundação Nacional de Ciências
PAR	Photosynthetically Active Radiation, radiação fotossinteticamente ativa,
ppm	Parte por milhão
PPGEM	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFRN
QMD	Quadrado Médio Dentro $\rightarrow$ variância
QME	Quadrado Médio Entre $\rightarrow$ variância
QMT	Quadro Médio Total $\rightarrow$ variância
RIV	Radiação Infravermelha
RUV/UVR	Radiação ultravioleta, ultraviolet radiation em inglês

SQD	Soma de Quadrados Dentro → variância
SQE	Soma de Quadrados Entre → variância
SQT	Soma de Quadrados Total → variância
SZA/ASZ	Solar Zenith Angle ou ângulo Solar de Zênite
UFRN	Universidade Federal do Rio Grande do Norte
WHO/OMS	World Health Organization/Organização Mundial de Meteorologia
$\lambda$	Comprimento de onda

## CAPÍTULO 1

### 1 Introdução

A evolução da vida na Terra está diretamente ligada à radiação ultravioleta (RUV). Em 1952, Stanley Miller fez circular em um balão de vidro uma mistura que se acredita compunha a atmosfera primitiva da Terra há cerca de cinco bilhões de anos (vapor d'água, hidrogênio, amônia e metano). Estimulou a mistura com descargas elétricas e, ao analisar os produtos, constatou a formação de aminoácidos, i.e., elementos indispensáveis ao desenvolvimento de enzimas e outras proteínas essenciais à vida. Outros pesquisadores repetiram o experimento substituindo a descarga elétrica por RUV e também obtiveram a síntese de compostos complexos (PFEIFFER *et al.*, 1967 e ESCP, 1981). Atualmente, a vida na Terra se sustenta devido, entre outros fatores à camada de ozônio. A partir de cálculos de transferência radiativa estima-se que uma redução de 4 a 5% no ozônio (O<sub>3</sub>) atmosférico aumentaria em aproximadamente 20% a RUV biologicamente ativa que chega à superfície. Teoricamente, uma redução de 1% no ozônio atmosférico causaria um aumento de 1,2% na RUV, com drásticos efeitos à vida (ECHER, 1999).

Entre os danos a processos químicos e biológicos associados à RUV, citam-se: queimaduras e envelhecimento precoce da pele humana, edemas, aumento de infecções por fungos, inflamações, vesículas, diminuição da resistência imunológica, fotodermatoses, fotoalergias (eczematoses, urticárias, prurido, reações a medicamentos), catarata, câncer de pele, atenuação do crescimento de lavouras, cânceres e mutações genéticas em peixes e anfíbios, diminuição da produção de fitoplâncton, deterioração de tintas e de materiais poliméricos, entre outros (DIFFEY, 1991; RIBEIRO *et al.*, 2000; ROLLANO, 2002; PALENQUE, 2002; CORREIA, 2003; MEDEIROS, 2003; KUDISH *et al.*, 2003).

Por outro lado, quando a RUV incide na derme humana, moléculas são transformadas em vitamina D<sub>3</sub>, que entra na corrente sanguínea e é transportada aos órgãos, estando associada a processos deflagrados por 200 genes, com ações como: prevenção de raquitismo, liberação de hormônios, absorção de nutrientes, manutenção do ritmo cardíaco, regulação das glândulas paratireóides, rins e intestino, regulação do metabolismo osteoblástico e da pressão arterial, secreção de hormônio paratireóide, fortalecimento do sistema imunológico, ação antidepressiva, prevenções do diabetes tipo II e dos cânceres de mama, próstata, pulmão e intestino (MOAN *et al.*, 2005).

O excesso de exposição à RUV também traz problemas. Em todo mundo, anualmente, são diagnosticados entre dois e três milhões de novos casos de câncer de pele não-melanoma e mais de 130 mil novos casos de melanomas malignos. Um em cada cinco americanos e um entre cada dois australianos desenvolverá algum tipo de câncer no decorrer de sua vida (WHO, 2002). Com base nos estudos, alguns países resolveram implantar programas de prevenção e esclarecimento da população quanto aos efeitos da radiação solar. Paralelamente aos benefícios à população, esses programas diminuem significativamente os custos com saúde pública, beneficiando outros setores da economia. A título de exemplo, programas realizados na Austrália custam cerca de US\$ 0,08 por habitante/ano, enquanto os custos diretos do tratamento do câncer da pele são estimados em US\$ 5,70 por habitante/ano (AIHW, 2002).

Diversos fatores climáticos, geográficos e sazonais podem incrementar ainda mais o número de casos de câncer de pele e de outras doenças relacionadas à exposição ao sol. Dentre os fatores geográficos, podem ser citados os centros urbanos e turísticos localizados em regiões próximas à linha do equador. Percebe-se, pois, a importância do estudo da RUV, especialmente em países tropicais, onde naturalmente a camada de O<sub>3</sub> já é mais delgada e a radiação solar mais intensa. No Brasil, segundo dados do Instituto Nacional de Câncer, 25% dos casos de câncer registrados são de pele. Em 2002 foram 65.000 novos casos de não-melanoma, 3.500 casos de melanoma maligno e 2.000 óbitos decorrentes deste último tipo.

Natal-RN (05° 45' 54" S – 35° 12' 05" W), cidade litorânea do nordeste brasileiro, apresenta elevados índices de radiação solar durante todo o ano, com valores similares até mesmo aos registrados em regiões montanhosas da Bolívia (KIRCHHOFF, 1995). Entre as conseqüências para saúde pública destacam-se elevados índices de queimaduras (eritema) e distúrbios oftalmológicos (catarratas e conjuntivites), além de uma das maiores incidências de câncer de pele do Brasil.

No Laboratório de Variáveis Ambientais Tropicais – LAVAT, do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – Centro Regional do Nordeste – INPE/CRN, situado em Natal–RN, monitora-se diariamente a RUV do sol. No presente trabalho pretende-se analisar o comportamento do índice de RUV solar em Natal no período de janeiro de 2001 a dezembro de 2007, com base nos dados do radiômetro GUV (Ground based UltraViolet radiometer).

## **1.1 Objetivo geral**

Analisar a variação da RUV solar em Natal nas faixas de 305 nm, 320 nm, 340 nm e 380 nm e dose eritêmica, no período de janeiro de 2001 até dezembro de 2007, utilizando-se dados do radiômetro GUV, instalado no Laboratório de Variáveis Ambientais Tropicais do INPE/CRN.

## **1.2 Objetivos específicos**

Identificar padrões de variações da intensidade da RUV solar mensal e anual, nos comprimentos de ondas: 305 nm, 320 nm, 340 nm e 380 nm e dose eritêmica, medidos entre 2001 a 2007;

Determinar valores médios mínimos e máximos do índice de ultravioleta e

Estabelecer relações entre índices de radiação e horários, identificando faixas inadequadas à exposição humana.

## CAPÍTULO 2

### 2 Revisão bibliográfica

Neste capítulo são discutidos alguns aspectos da interação da radiação ultravioleta solar com a atmosfera terrestre e suas conseqüências para os seres vivos e os materiais.

#### 2.1 A Radiação Solar

A investigação da natureza da luz remota à Grécia antiga, onde as opiniões sobre o tema dividiram-se: enquanto a escola pitagórica considerava que os objetos se tornavam visíveis por emitirem uma corrente contínua de corpúsculos, Aristóteles (384 a.C. – 322 a.C.) defendia que a luz se propagava em forma de ondas (MUELLER et al., 1968).

Em 1887, na mesma experiência em que produziu e detectou ondas eletromagnéticas, Heinrich Hertz (1857 - 1894) observou que um metal adquiria carga positiva quando exposto à radiação eletromagnética, fato só explicado em 1900, por Phillip Lenard (1862-1947): a luz ultravioleta ejetava elétrons do metal, causando o “efeito fotoelétrico”. Descobriu-se depois que a intensidade da luz incidente afetava o número de elétrons ejetados, mas não a energia máxima dos elétrons, ou seja, a energia dos elétrons emitidos era inversamente proporcional ao comprimento de onda da radiação incidente, fato que não podia ser explicado pela teoria ondulatória vigente (MUELLER et al., 1968).

Somente em 1905, apoiado nos trabalhos de Max Planck (1858 - 1947), Albert Einstein (1879 - 1955) propôs uma explicação desse efeito, comprovada por Arthur Compton (1892 - 1962), que em 1923 determinou a energia cinética e, portanto, a massa do fóton (EISBERG e RESNICK, 1979). Retomava-se, assim, a teoria corpuscular da radiação.

O estudo científico da energia solar teve início oficial com Isaac Newton (1643-1727), em 1666. Em 1800, William Herschel (1738-1822) descobriu a radiação infravermelha e em 1801 Johann Ritter (1776-1810) identificou a radiação ultravioleta. Planck, por sua vez, demonstrou que a energia da radiação eletromagnética é inversamente proporcional ao comprimento de onda, por meio da expressão:

$$E = \frac{n.h.c}{\lambda} \quad (2.1)$$

Onde:  $E$  – energia radiante emitida ( $\text{W/m}^2$ )

$n$  – número de fótons

$h$  – constante de Planck ( $6,63 \times 10^{-23}$  J.s)

$c$  – velocidade da luz no vácuo ( $2,998 \times 10^8$  m/s)

$\lambda$  – comprimento de onda (m).

Vê-se que a energia de um fóton de ultravioleta (e.g.,  $\lambda \cong 300$  nm) é muito superior a de um fóton de infravermelho (e.g.,  $\lambda \cong 700$  nm). O espectro da luz solar assemelha-se ao de um corpo negro aquecido à cerca de 5.700 K (EISBERG e RESNICK, 1979), o que representa aproximadamente  $5,98 \times 10^7$   $\text{W/m}^2$ , de acordo com a lei de Stefan-Boltzmann, dada por:

$$E_{TOT} = \int_0^{\infty} \frac{2hc^2 \lambda^{-5}}{e^{(hc/\lambda kT)} - 1} = \sigma \cdot T^4 \quad (2.2)$$

Onde:  $k$  – constante de Boltzmann ( $1,38 \times 10^{-23}$  J/K)

$\sigma$  – constante de Stefan-Boltzmann ( $5,67 \times 10^{-8}$   $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ )

$T$  – temperatura média da superfície emissora de radiação (K).

Considerando-se o valor da temperatura média na superfície do Sol, o pico de máxima intensidade da radiação emitida, conforme estabelece a lei de Wien (ver eq. 2.3), corresponde a  $\lambda \cong 500$  nm, ou seja, dentro da faixa do espectro visível ao olho humano (400 a 700 nm).

$$\lambda_{m\acute{a}x} \cdot T = 2,8977685 \times 10^{-3} \text{ (m} \cdot \text{K)} \quad (2.3)$$

Onde:  $\lambda_{m\acute{a}x}$  – comprimento de onda da máxima intensidade de radiação emitida.

Na figura 2-1 comparam-se os espectros solar e de corpo negro, sendo indicados os principais elementos absorvedores da radiação solar e suas respectivas faixas de absorção. Observa-se boa aproximação entre a energia no topo da atmosfera e a de um corpo negro. Ao nível do mar a energia é atenuada devido à absorção e ao espalhamento pela atmosfera.

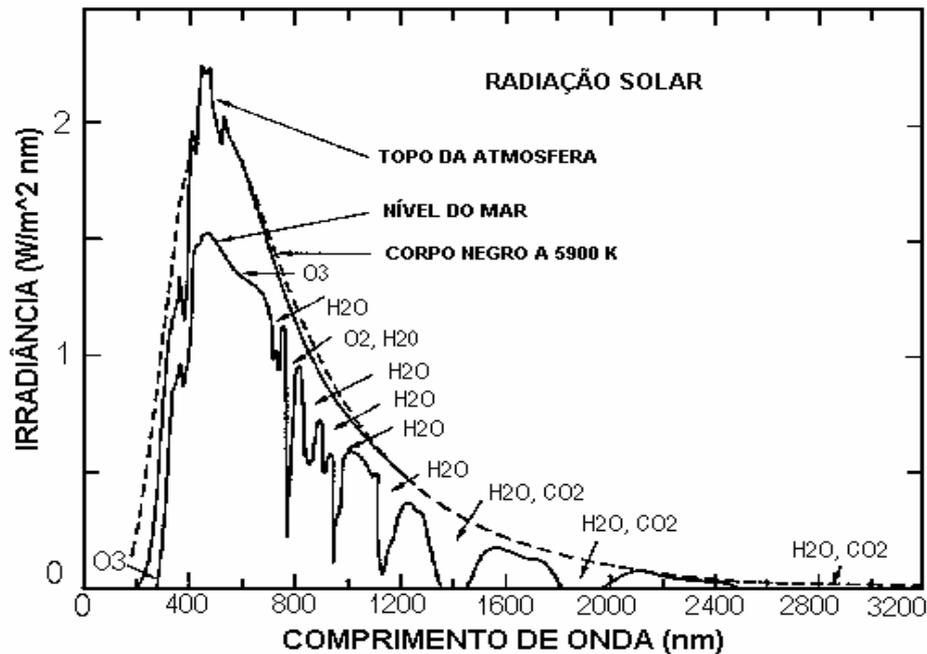


Figura 2-1: Comparação entre radiação solar e corpo negro (Brasseur e Solomon, 1986)

Desde a superfície solar, onde o fluxo atinge cerca de  $5,98 \times 10^7 \text{ W/m}^2$ , até a Terra, a energia emitida pelo Sol varia de acordo com a lei do inverso do quadrado da distância. Assim, se estabeleceu um valor padrão denominado de constante solar ( $C_S$ ), relativo à quantidade de energia recebida por unidade de área, no limite exterior da atmosfera quando a Terra se encontra a uma distância média do Sol. É interessante observar que a  $C_S$  varia segundo o autor, desde  $1.322 \text{ W/m}^2$  até  $1.382 \text{ W/m}^2$  (KIRCHHOFF, 1991). Com base em dados de satélites, a maioria dos autores adota para a  $C_S$  o valor de  $1.367 \text{ W/m}^2$ .

A intensidade da radiação solar que atinge a Terra é monitorada desde 1883 (LAMB, 1975). Com base nos dados coletados foi possível estudar os efeitos da dispersão da energia por poeira na alta atmosfera em decorrência das erupções vulcânicas de 1883, 1888, 1902, 1912, 1963 e de 1991; esse último nas Filipinas, quando a erupção do Pinatubo causou uma redução de cerca de  $1^\circ\text{C}$  na temperatura média global (LABITZKE e McCORMICK, 1992).

A variação sazonal da radiação solar que chega a Terra depende de fatores geográficos (altitude, latitude), astronômicos (declinação solar, distância ao Sol), geométricos (zênite, azimute), físicos (espalhamento e absorção moleculares, espalhamento por aerossóis), químicos (concentração de  $\text{O}_3$ , coluna atmosférica de aerossóis) e meteorológicos (nebulosidade, albedo da superfície) (LENOBLE, 1993; ZAMORANO, 1997 e VANICEK et al., 1999).

O ciclo de 11 anos, quando a irradiância solar muda em cerca de 0,1%, é um exemplo de variação de período longo. A rotação solar (27 dias) causa uma variação de período curto. Explosões solares podem aumentar a irradiância solar em curtíssimo período, tipicamente de alguns minutos (ECHER, 1999).

## 2.2 A atmosfera terrestre

A atmosfera é apenas um dos cinco sistemas que determinam o clima na Terra, além da criosfera, biosfera, litosfera e hidrosfera. Sua função é promover a distribuição da energia térmica proveniente do Sol, reduzindo as amplitudes entre as temperaturas diurna e noturna e, portanto, determinando o modo como a energia solar entra e sai do planeta.

Ao atravessar a atmosfera, parte da radiação solar é filtrada, i.e., interage com as moléculas do ar. A energia cujo comprimento de onda corresponde ao ultravioleta (RUV), por exemplo, é em parte absorvida pela camada de ozônio, situada entre 15 e 50 km de altura (RIBEIRO et al., 2000).

A temperatura do ar é a grandeza metrológica utilizada para dividir a atmosfera terrestre em camadas, conforme se encontra representado na figura 2-2. A relação entre temperatura e altura, assim como os limites entre as diversas camadas, variam, entre outros fatores, em função do local e do período do ano.

Na troposfera está concentrada a maior parte do volume total da atmosfera. É nela que ocorre a maioria dos fenômenos meteorológicos e onde a quase totalidade da vida terrestre se desenvolve. Nela, a temperatura do ar decai de modo quase uniforme com a elevação, até chegar à tropopausa, situada a cerca de 11 km acima da superfície (dependendo da latitude) onde permanece quase constante até a estratosfera (ver Fig. 2-2).

A partir de aproximadamente 16 km no equador (11 km nas latitudes temperadas), a estratosfera estende-se até próximo de 50 km e contém o ozônio, um elemento vital para vida no planeta. Na região entre a tropopausa e o limite superior da estratosfera, a temperatura é determinada pela absorção direta de ultravioleta por moléculas de H<sub>2</sub>O e O<sub>3</sub>, enquanto entre a mesopausa e a termosfera a temperatura é determinada tanto pela absorção de ultravioleta como pela ionização de partículas que compõem a ionosfera (KIRCHHOFF, 1991). Para Sureda e Gil (1979), o aumento da temperatura na mesosfera pode advir da liberação de energia devido à constante produção e destruição do ozônio pela radiação solar.

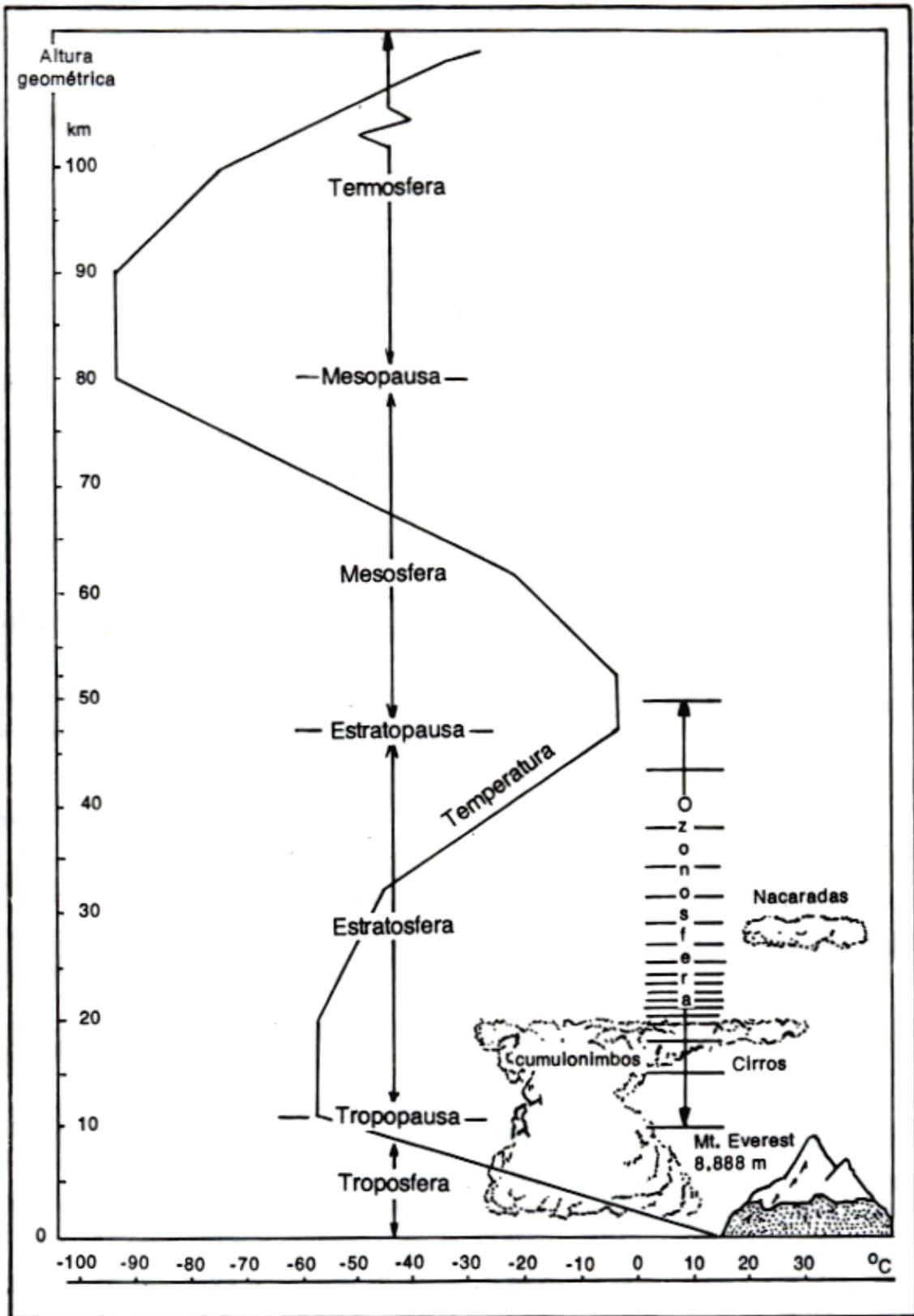


Figura 2-2: Estrutura vertical da atmosfera terrestre (valores médios). Fonte: Vianello, 2000

### 2.3 Interação atmosfera - radiação

A atmosfera terrestre tem comportamento distinto para os diferentes comprimentos de onda da radiação que por ela passa, sendo praticamente transparente à radiação solar que penetra e, ao mesmo tempo, opaca à radiação re-emitada pelo planeta. Subtraídos os efeitos das erupções vulcânicas, constatou-se uma redução progressiva da radiação solar desde 1945, fenômeno que pode ser atribuído à própria física do Sol, como já ocorreu em diversas ocasiões ao longo de sua história e que poderiam obedecer a um ciclo de 200 ou 400 anos (LAMB, 1975), associado às mudanças no clima e nos regimes dos ventos.

Além de mudanças no comportamento do Sol, especula-se que passagens do sistema solar através de poeira cósmica, alterações da órbita ou modificação da inclinação do eixo do planeta também poderiam interferir. Sabe-se, por exemplo, que o ângulo de inclinação da Terra está diminuindo, causando redução da diferença entre os climas no verão e no inverno (RIBEIRO et al., 2000). Contudo, ainda não há consenso sobre o tema.

Da energia emitida pelo Sol, a Terra intercepta cerca de 0,002% (GRAEDEL e CRUTZEN, 1997, *apud* RIBEIRO et al., 2000). Apesar da aparente insignificância, essa quantidade dá origem aos principais processos climáticos existentes no planeta. Na tabela 2-1 apresenta-se a distribuição da energia solar na Terra, em valores médios.

**Tabela 2-1: Distribuição da energia solar na Terra**

<b>Fenômeno</b>	<b>%</b>
Reflexão por nuvens e aerossóis	21
Reflexão pela superfície	09
Absorção (vapor d'água da troposfera e O <sub>3</sub> da estratosfera)	21
Absorção pela superfície	49

**Fonte: Graedel e Crutzen (1997), *apud* Ribeiro et al., (2000).**

Vapor d'água e CO<sub>2</sub> são os principais reguladores da temperatura na superfície, absorvendo parte da radiação infravermelha (RIV) emitida pelo planeta e evitando liberação de grandes quantidades de calor ao espaço (efeito estufa). Cerca da metade dos 49% da energia absorvida pela superfície volta à atmosfera como calor latente, durante a condensação

da água (formação de chuvas). Do restante, cerca de 7% voltam à atmosfera como energia cinética (ventos), energia térmica (correntes convectivas) e RIV. Só 19% da energia absorvida pela superfície voltam ao espaço como radiação. Portanto, dos 49% da energia diretamente absorvida pela superfície, 9,31% retornam ao espaço como RIV e o restante é aproveitado pelos sistemas terrestres (GRAEDEL e CRUTZEN, 1997, *apud* RIBEIRO et al., 2000). Com quase 90% da radiação emitida pela Terra sendo absorvidas pela atmosfera e esta, por sua vez, re-irradiando quase 80% de volta à superfície, o planeta mantém-se em uma temperatura média de 15°C, bem superior aos - 18°C que seriam atingidos se gases do efeito estufa (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, O<sub>3</sub> e N<sub>2</sub>O) não existissem na atmosfera. Como há equilíbrio térmico, a radiação solar interceptada pelo planeta é integralmente devolvida ao espaço (RIBEIRO et al., 2000).

## 2.4 Atmosfera e vida

Parte da literatura considera como função primordial da atmosfera distribuir a energia solar de modo adequado à vida. Discutir essa visão antropocêntrica foge ao escopo deste trabalho. Distribuindo a energia e, portanto, reduzindo a diferença entre as temperaturas diurna e noturna, fator essencial à vida, a atmosfera regula a entrada e a saída da energia no planeta.

Sabe-se há muito que a energia solar é o fator determinante do sistema climático terrestre. Em 500 a.C., o grego Hecataeus de Miletus (550 a.C. – 490 a.C.) elaborou um mapa que dividia o mundo conhecido em zonas climáticas em função da latitude (ESCP, 1973). Hoje, além da variação do ângulo de incidência da radiação solar, há muitos fatores envolvidos, como: duração do dia, física do Sol, presença de poeira cósmica, variações na órbita e no eixo de inclinação da Terra e causas antropogênicas ou naturais ainda desconhecidas, que modificam a relação entre a energia absorvida e emitida pela Terra.

A composição atmosférica de um planeta é determinada principalmente em função da força gravitacional. Planetas pequenos (Terra, Mercúrio, Vênus e Marte) não conseguem reter moléculas leves, como hidrogênio e hélio. Esses elementos predominam nas atmosferas de planetas de massas elevadas (Júpiter, Saturno, Urano e Netuno). A teoria mais aceita sobre a formação da atmosfera terrestre sugere um processo concomitante à sua própria formação, i.e., os gases da atmosfera teriam origem na poeira e nos resíduos que formaram o sistema solar. O aquecimento interno da Terra, iniciado há cerca de 4,6 bilhões de anos, liberou os gases aprisionados nas rochas, eles se difundiram até elevadas altitudes, começaram a sofrer a influência da RUV solar e, posteriormente, produziram moléculas de O<sub>3</sub>.

Mudanças climáticas ocorridas há bilhões de anos permitiram que, por volta de 800 milhões de anos atrás, a vida saísse dos oceanos e se desenvolvesse na superfície. Assim, cerca de 450 milhões de anos atrás houve uma redução do nível de RUV próximo à superfície, permitindo um exponencial desenvolvimento de sistemas fotossintetizantes, aumentando o nível de O<sub>2</sub> na atmosfera. O O<sub>2</sub> era absorvido pelos oceanos e rochas enquanto o CO<sub>2</sub>, liberado pelos vulcões e florestas, era absorvido pelos oceanos e novamente pelas florestas, permitindo ao planeta atingir o ponto de produção auto-sustentada de O<sub>2</sub> (DEMILLO, 1998).

Em 1772, Antoine Lavoisier (1743 - 1794) foi o primeiro a afirmar que o ar é uma mistura de vários gases, um dos quais sustenta a combustão. A composição média (78% de nitrogênio, 21% de oxigênio, 0,9% de argônio, 0,04% de dióxido de carbono, de 0 a 7% de vapor d'água e outros gases) não é uniformemente distribuída na atmosfera, ficando cerca de 99% da massa concentrada nos primeiros 30 km de altura (RIBEIRO et al., 2000 e VIANELLO, 2000). A distribuição dos componentes é resultado de reações químicas que, por sua vez, derivam das interações (excitação, dissociação e ionização) com a radiação solar. Fator determinante do clima, a radiação solar exerce grande influência sobre os seres vivos. A título de ilustração, sabe-se que alguns répteis (e.g., tartarugas, crocodilos e jacarés) têm o sexo determinado em função da quantidade de energia que é absorvida durante a incubação.

Para sobreviver, um organismo deve manter seu ambiente interno dentro de uma determinada faixa de condições físico-químicas, independente das condições externas. Os ajustes metabólicos que garantem a estabilidade interna (homeostase) dependem de estímulos externos, como temperatura e disponibilidade de luz solar (PURVES et. al., 2002).

Há teorias que atribuem o aumento do cérebro humano aos desafios de adaptação a novos ambientes. Na medida em que, por diversos motivos, os primeiros representantes do gênero *homo* migravam, enfrentavam novas condições geográficas e climáticas que impunham novos desafios, obrigando-os a desenvolver a fala, construir ferramentas e criar novas estratégias de sobrevivência, tendo como consequência o aumento do volume craniano. A condenação do determinismo natural, a partir de meados do século XX, relegou ao segundo plano muitos estudos sobre a relação entre geografia e moléstias (MENDONÇA, 2001).

Há diversos trabalhos que tratam da relação entre clima e comportamento dos seres vivos. Hipócrates (460 a.C. - 377 a.C.), em seu trabalho "*Ares, Águas e Lugares*", estudou a influência do clima sobre os homens (MENDONÇA, 2001). Manoel de Abreu (1894 - 1962), criador da abreugrafia, defendeu em 1914 a tese de doutorado intitulada "*Natureza Pobre*", onde tratou da influência do clima tropical sobre a civilização.

Em 1900, Wladimir Köppen (1846 - 1940) elaborou uma classificação climática mundial baseada na distribuição da vegetação, posteriormente aperfeiçoada por Rudolf Geiger (1894 - 1981), ficando conhecida como classificação climática de Köppen-Geiger (ESCP, 1973). Hardy (1981) estudou como a temperatura determina a biologia dos animais. Monteiro (1991) destacou o papel hegemônico do clima na Geografia e salientou a influência dos eventos naturais nas organizações sociais, econômicas e políticas. Mendonça (2001) tentou estabelecer uma correlação não determinista entre clima e criminalidade. Durschmied (2004) analisou a influência do clima no resultado de conflitos armados entre 9 d.C e 1965.

Desde a década de 1980, cresceu o número de estudos que tentam estabelecer relações entre mudanças climáticas e ações antropogênicas. Ribeiro *et al.*, (2000) analisaram dados da relação entre mudanças climáticas e emissão de gases por veículos automotores. Flannery (2007) propôs que, mediante um esforço mundial concentrado, seria possível reduzir em 70% as emissões de gases e, desse modo, estabilizar o clima do planeta. Antagonicamente, Perry e Chilton (1980) afirmam que a atmosfera terrestre é dotada de capacidade autodepuradora.

Apesar de P. J. Crutzen, M. J. Molina e F. S. Rowland terem recebido o Prêmio Nobel de Química de 1995 pela teoria da depleção do ozônio pelos CFCs, a hipótese é contestada por vários pesquisadores. Para Demillo (1998), é difícil provar que CFCs destruam O<sub>3</sub> na atmosfera, sendo mais provável que a variação na concentração integre algum ciclo natural, e afirma que há indícios de que teve início um novo período de aumento da produção de O<sub>3</sub>. Independentemente das causas, naturais ou antropogênicas, a emissão de particulados altera a composição da atmosfera e, conseqüentemente, interfere no equilíbrio entre a quantidade de radiação proveniente do Sol que é absorvida e re-emitida pela Terra.

## **2.5 Radiação Ultravioleta e Ozônio**

Descoberta em 1801 por Ritter, a RUV constitui cerca de 7% da energia emitida pelo Sol. Situada entre 100 e 400 nm, é dividida para estudos fotobiológicos em: UV-A (320-400 nm), não absorvida pela atmosfera, atenuada apenas por espalhamento; UV-B (280-320 nm), absorvida pelo O<sub>3</sub> e UV-C (100-280 nm) totalmente absorvida (ROBINSON, 1966).

Emitida pela fotosfera, região mais estável do Sol, a maior parte da energia solar situa-se na faixa da luz visível. Emitida pela cromosfera, região mais instável do Sol, a RUV é mais variável, com efeitos diretos nas camadas mais externas da atmosfera terrestre (KIRCHHOFF, 1991).

No ciclo de 11 anos, quando a irradiância solar muda em cerca de 0,1%, a RUV varia cerca de 1%, ou 0,1% ao ano (SILVA, 2002). As variações são mais intensas para  $\lambda < 290$  nm. Acima disso, são inferiores a 1%. Logo, para  $\lambda > 290$  nm a RUV pode ser considerada constante em curtos períodos de tempo, como ao longo de um dia (ECHER, 1999).

Em 1839, o químico Christian Schönbein (1799 - 1868) notou um odor durante descargas elétricas na atmosfera similar àquele característico da água quando decomposta por correntes voltaicas. Atribuiu o fato a um gás atmosférico de odor peculiar, que denominou de ozônio (do grego “ozein” = cheiro). Gás minoritário da atmosfera terrestre, o  $O_3$  participa ativamente da química da atmosfera, tanto na troposfera como na estratosfera. Sendo instável, tem baixa concentração (ppm). Considerando uma concentração total média de 300 UD (unidades Dobson), o  $O_3$  contido na atmosfera ocuparia uma camada de cerca de 3 mm de espessura se fosse submetido nas condições normais de temperatura e pressão (273°K e 1 atm), logo 1 UD equivale a uma camada de  $O_3$  com 0,01 mm de espessura.

Cerca de 90% do  $O_3$  forma-se na estratosfera (BRASSEUR e SOLOMON, 1986 e RIBEIRO et al., 2000). O fenômeno de formação e/ou depleção é complexo, pois a RUV tanto gera  $O_3$  como o quebra, sendo esse o processo de filtragem que diminui a quantidade dessa radiação que atravessa a atmosfera. Ao atingir uma molécula de  $O_2$  na estratosfera, o fóton de RUV causa uma fotodissociação, deixando átomos de oxigênio (O) livres para combinações com outros elementos. A combinação com  $O_2$  produz  $O_3$ , conforme esquema abaixo (BRASSEUR e SOLOMON, 1986).



A região da atmosfera onde ocorre absorção de RUV está situada principalmente entre 30 e 40 km de altura e é composta de  $O_3$  e vapor d'água. A máxima absorção ocorre na estratosfera, nos comprimentos de onda de 200 a 310 nm (faixa de Hartley). Nesse intervalo está a maior parte da RUV-B (280 a 320 nm), que oferece riscos aos organismos vivos. Acima de determinada dose, a RUV-B é letal para os organismos unicelulares e para as células superficiais de plantas e animais superiores (BRASSEUR e SOLOMON, 1986).

Entre 15 e 50 km, o ozônio atua como um filtro da RUV, enquanto na troposfera inferior (região da biosfera) é extremamente reativo e venenoso. A camada de O<sub>3</sub> bloqueia 5% da RUV-A e 95% da RUV-B. As nuvens bloqueiam perto de 20% da RUV-B e são quase transparentes à RUV-A. Areias de praias intensificam a RUV, refletindo até 25% da radiação incidente. Nas montanhas, a intensidade da radiação solar aumenta até 8% a cada 1000 m de altitude (VANICEK, 1999). Variações na camada de O<sub>3</sub> podem alterar a química da atmosfera e modificar o perfil de temperatura, com graves consequências à vida (KIRCHHOFF, 1992). A RUV de alta frequência, absorvida entre 100 e 200 km, ioniza e aquece as moléculas do ar, causando expansão térmica da atmosfera e gradientes horizontais de pressão que, por sua vez, geram os ventos termosféricos, associados às alterações nas órbitas de satélites artificiais e que podem ter causado a reentrada da estação espacial Skylab, em 1979. A absorção da RUV pelo O<sub>3</sub> e pelo vapor d'água gera gradientes de pressão na estratopausa que causam oscilações maiores que as marés atmosféricas geradas pela Lua e pelo Sol (KIRCHHOFF, 1991).

## 2.6 Efeitos da RUV nos Seres Vivos

Detectar calor é a principal função da pele, maior órgão do corpo humano. Conforme descobriram Aaronsohn e Sachs, em 1885 (ASHCROFT, 2001), o controle da temperatura do corpo está no hipotálamo. A radiação ambiental também pode influenciar nas dimensões do corpo humano: habitantes do pólo norte são atarracados para reduzir a dissipação de calor, enquanto habitantes da savana africana são altos e esguios para dissipar mais calor. Variações também são observadas em animais, como ocorre entre os elefantes africano e indiano.

Para contornar a escassez de alimento no deserto, seres humanos e outros animais armazenam gordura. Contudo, sendo a gordura um excelente isolante térmico e, se dispersada sob a pele, impediria a perda de calor, habitantes do deserto tendem a armazenar sua gordura num único lugar. Esse é o caso do camelo, que armazena gordura nas corcovas, e do povo *hotentote*, que habita a África do Sul e armazena gordura nas nádegas (ASHCROFT, 2001).

Para Hardy (1981), a temperatura é um dos principais fatores determinantes da distribuição ecológica de uma espécie animal. Enzimas envolvidas nos processos metabólicos de mamíferos e aves operam melhor na faixa de 30 a 40°C, enquanto que em répteis, peixes, anfíbios e invertebrados funcionam de acordo com a temperatura que prevalece no ambiente. Assim, a evolução dos mecanismos de regulação de temperatura em mamíferos e aves teria ocorrido no sentido do controle dos processos de troca térmica entre o corpo e o ambiente.

Lagartos são ditos “heliotermos” em função dos complexos mecanismos que desenvolveram para termoregulação. Alguns insetos regulam a quantidade de energia radiante que absorvem alterando a pigmentação e a orientação em relação ao Sol. O gafanhoto australiano (*Kosciuscola tristis*) apresenta coloração clara quando em ambientes com temperaturas elevadas e, conforme a temperatura diminui, torna-se progressivamente mais escuro. Entre 17°C e 20°C, o gafanhoto do deserto (*Schistocerca gregaria*) move-se alinhado perpendicularmente ao Sol; entre 39°C e 43°C, orienta-se paralelamente (HARDY, 1981).

Sob temperatura confortável, o homem libera cerca de 60% de sua energia na forma de RIV, entre 90.000 e 200.000 nm (ASHCROFT, 2001). A baixa capacidade calorífica do ar não permite absorção da radiação liberada. Assim, o corpo irradia para objetos sólidos do entorno. A taxa de transferência de calor por radiação do corpo humano é regulada pelo fluxo sanguíneo da pele e pela temperatura dessa. Esses mecanismos fisiológicos primários são controlados pelo sistema nervoso linfático, ligado ao hipotálamo (HARDY, 1981). A capacidade do ser vivo de se adaptar ao ambiente por meio de mecanismos bioquímicos é tema de estudo da biometeorologia, ciência que analisa doenças com origens em mudanças atmosféricas (“doenças meteorotrópicas”), como: alergias, gripes, ataques apopléticos e epiléticos, angina de peito, apendicite, asma brônquica, dispepsias, embolias, eclampsia da gravidez, glaucoma, enfarte de miocárdio, nefrolitíase, pneumonia, poliomielite e reumatismo.

Radiações de ondas longas associadas às massas de ar estão relacionadas às variações da estabilidade coloidal do sangue e à velocidade de sedimentação dos glóbulos vermelhos. A falta de exposição à RUV provoca raquitismo e favorece ao tétano. Exposições prolongadas, contudo, induzem ao câncer. A RUV de alta frequência possui energia superior à energia mínima de ionização da água (cerca de 1.216 kJ/mol). Assim, quando um tecido vivo é irradiado, a maior parte da radiação é absorvida por moléculas d’água, que constituem cerca de 70% do tecido. Ionizada, a água torna-se altamente reativa e instável, formando um radical livre capaz de desencadear várias reações químicas e alterar as funções celulares. Medula óssea, tecidos formadores do sangue e nódulos linfáticos são os mais afetados e a principal consequência é o desenvolvimento de câncer, sendo a leucemia (aumento descontrolado de glóbulos brancos) o mais comum (SUREDA e GIL, 1979).

A relação dos seres vivos com a RUV é tão antiga quanto complexa. Acredita-se que, há cerca de dois bilhões de anos, as células eram invólucros contendo poucas moléculas dentro de uma única membrana. As “procarióticas” (células sem núcleos) viviam de modo independente, confinadas aos oceanos, protegidas da RUV solar. Deram origem às bactérias

cianófitas (algas azuis). Na mesma época, alguns procariotos seguiram o rumo oposto e desenvolveram a habilidade de utilizar a energia solar em seus metabolismos por meio da fotossíntese. Explorando a luz solar e gerando como subproduto o oxigênio, mudaram a atmosfera, uma vez que o oxigênio liberado originou a camada de ozônio, com capacidade para filtrar a RUV. Embora tenha ocorrido somente nos últimos 800 milhões de anos da evolução, o fato fez surgir moléculas mais complexas, que evoluíram e, finalmente, saíram da água para se estabelecer na superfície do planeta (PURVES et al., 2002).

A exposição à radiação solar é vital aos seres humanos. Por volta do século VI a.C., filósofos jônicos já destacavam a importância do Sol para os organismos vivos, que teriam origem no lodo marinho, sob a ação do calor, do ar e do sol. Começava aí a teoria da geração espontânea, segundo a qual a vida poderia originar-se na matéria inanimada e que ganhou adeptos como Aristóteles, Paracelso (1493 - 1541), Descartes (1596 - 1650) e Newton. Em 1860, a Academia Francesa de Ciências estipulou um prêmio para quem solucionasse, com provas experimentais, a questão da geração espontânea. Pasteur (1822 - 1895) demonstrou que, tomados os devidos cuidados para se evitar contaminações, nenhuma vida poderia surgir num frasco contendo uma solução que fosse exposta ao ar (PFEIFFER et al., 1967).

Na Europa, entre os séculos XVIII e XIX, quando a revolução industrial fez crescer a migração do campo para cidades, houve aumento do raquitismo, doença infantil deformadora, caracterizada pela falta de resistência óssea. Em 1822, quando o problema tornou-se uma epidemia, o médico polonês Jedrzej Sniadecki (1768-1838) observou que eram raros os casos da doença no interior da Polônia e iniciou experiências com crianças urbanas. Concluiu ser possível curar o raquitismo com simples banhos de sol. Atualmente, na cidade russa de Murmansk, devido à situação geográfica, crianças são submetidas às sessões de banhos de RUV produzida por lâmpadas, como forma de compensar os efeitos da falta de radiação solar.

Absorvida pela pele humana, a RUV-B converte o 7-dehidrocolesterol, presente na epiderme em pré-vitamina D<sub>3</sub>, que se isomeriza em vitamina D<sub>3</sub>, num processo controlado pela temperatura da pele e que dura até três dias. Pequenos períodos de exposição ao sol são suficientes para desencadear o processo. Em baixas latitudes, cerca de 15 minutos de exposição das mãos, braços e face entre 09h00 e 16h00 são suficientes para regular a produção. A vitamina D<sub>3</sub> age sobre os ossos, glândulas paratireóides, rins e intestino, regulando o metabolismo da função osteoblástica (produção óssea) e da secreção de PTH (hormônio paratireóide) e sendo essencial para evitar o raquitismo em crianças (CORREIA, 2003 e MOAN et al., 2005).

Para Purves et al. (2002), a fotossíntese é a base da vida na Terra, tendo a luz solar papel preponderante para sua manutenção. A eficiência da conversão da energia solar em energia química pelas plantas é de cerca de 4%. O processo ocorre por meio de pigmentos que, em sua maioria, absorvem radiação na faixa visível do espectro. As clorofilas, absorvedoras da luz com comprimentos de onda azul e vermelho, formam apenas um dos grupos de pigmentos necessários à realização da fotossíntese; os outros são o beta-caroteno, a ficoeritrina e a ficocianina, que absorvem fótons entre o vermelho e o azul. É interessante observar que as clorofilas estão presentes não só em vegetais, mas também em protistas (uni e multicelulares) e em bactérias. Ribeiro et al. (2000) afirmam que o aumento da RUV que chega à superfície da Terra é diretamente responsável pelas reduções da fotossíntese e do crescimento vegetal, pelo aumento do número dos casos de catarata e infecções por fungos, pelo enfraquecimento do sistema imunológico e pelo envelhecimento precoce da pele.

Para o estudo de efeitos biológicos no homem, utilizam-se espectros de ponderação, que proporcionam um peso maior aos comprimentos de onda de maior interação biológica. Dessa forma, estabelece-se uma relação entre a irradiância absoluta e o espectro de ação, obtendo-se uma irradiância ponderada. Na figura 2-3 apresenta-se o espectro de Ação de Eritema, proposto por McKinlay e Diffey (1987) e adotado como um padrão pela Comissão Internacional de Iluminação.

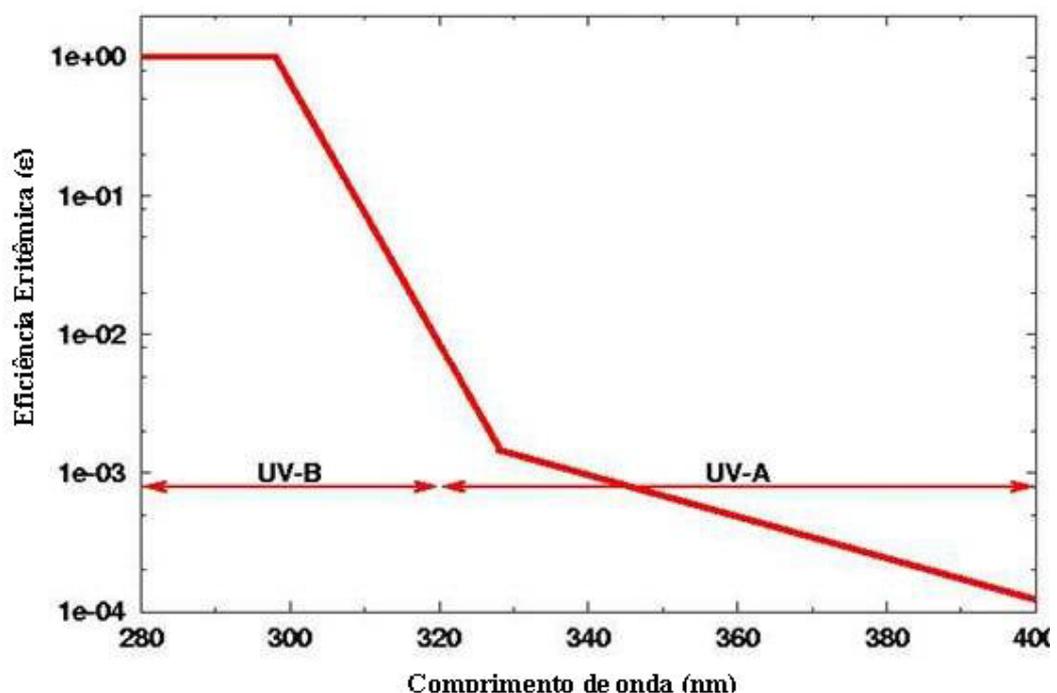


Figura 2-3: Espectro de Ação de Eritema proposto por McKinlay e Diffey (1987).

A irradiância eritêmica é dada por:

$$S_{\lambda} = I_{\lambda} \cdot \epsilon_{\lambda} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}] \quad (2.6)$$

Integrando-se (2.6) na faixa considerada (ultravioleta), obtêm-se a irradiância ponderada:

$$S = \int_{280\text{nm}}^{400\text{nm}} I_{\lambda} \epsilon_{\lambda} d\lambda \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (2.7)$$

Integrando-se a irradiância ponderada (2.7) em relação ao tempo, obtêm-se a “DOSE”:

$$Dose = \int_0^t \int_{280\text{nm}}^{400\text{nm}} I_{\lambda} \epsilon_{\lambda} d\lambda dt \quad [\text{J} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (2.8)$$

A “Dose” corresponde à quantidade de energia a que uma determinada pessoa foi exposta num processo de irradiação. O índice de ultravioleta (IUV), por sua vez, é uma padronização da irradiância eritêmica, definida por uma escala numérica onde 1 IUV = 25 mW/m<sup>2</sup> (WHO, 2002).

Para efeitos de saúde pública, foram definidos quatro tipos de pele humana, segundo a EPA (Environmental Protection Agency), dos Estados Unidos. Na tabela 2-2 apresentam-se os fotótipos de peles e suas respectivas características gerais.

Como prevenção à exposição excessiva aos raios solares, várias instituições desenvolveram um programa de índice de UV solar. Trata-se de um valor proporcional à intensidade da radiação medida ao meio dia local, ponderado com o espectro de sensibilidade biológica de eritema (CIE, 1987, *apud* VANICEK, 1999) e integrada no intervalo de comprimentos de ondas de 280 nm a 400 nm. É representado por um número entre 0 a 16 (adimensional), distribuído segundo as categorias apresentadas na tabela 2-3. Na tabela 2-4 são mostrados os índices UV-B e o tempo (em minutos) de exposição ao sol que pode gerar eritema.

Tabela 2-2: Fotótipos da pele humana.

Tipo de pele	Fotótipo de pele	Cor da pele	Característica	Dose Eritêmica (mJ.cm <sup>-2</sup> )
A	nunca bronzeia sempre queima	muito branca (loiras e ruivas)	queimadura avermelhada; inchaço doloroso	10 – 30
B	às vezes bronzeia em geral queima	morena Clara	aparência avermelhada; pode bronzear gradualmente	30 – 50
C	em geral bronzeia raramente queima	morena escura	raramente queima; bronzeamento rápido	40 – 75
D	sempre bronzeia raramente queima	morena bem escura e negra	raramente queima; bronzeamento muito rápido	50 – 120

Fonte: Kirchoff (1995).

Tabela 2-3:-Categorias e índices de UV-B

Categoria	Valor do índice
Baixo	menor que 2
Moderado	3 – 5
Alto	6 – 7
Muito Alto	8 – 10
Extremo	maior que 11

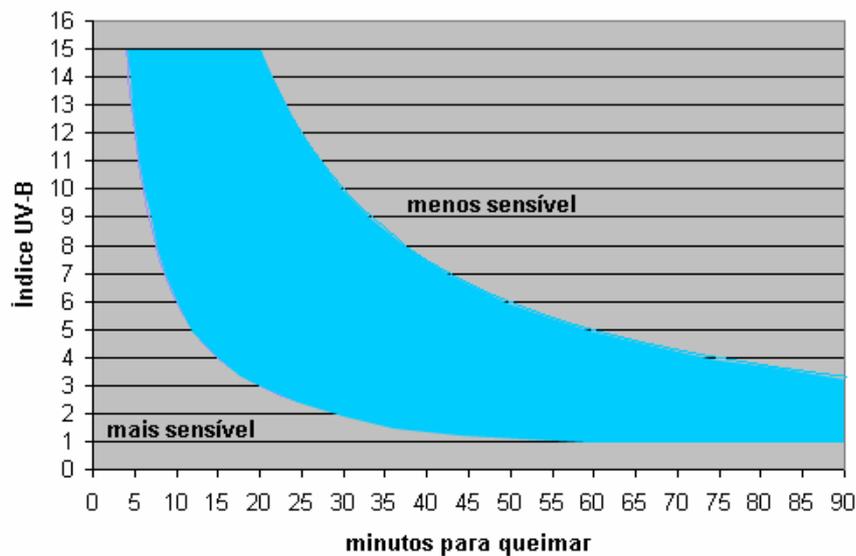
Fonte: (WHO, 2002)

Tabela 2-4: Índices de UV-B e tempo de exposição para causar queimaduras

Valor do índice	tempo (minutos) para queimar (pele mais sensível)	tempo (minutos) para queimar (pele menos sensível)
0 – 2	30	Mais do que 120
3	20	90
4	15	75
5	12	60
6	10	50
7	8,5	40
8	7,5	35
9	7	33
10	6	30
11	5,5	27
12	5	25
13	Menos de 5	23
14	4	21
15 – 16	Menos de 4	20

Fonte: Kirchoff (1995).

A título de exemplo, tomando-se duas pessoas, uma com pele tipo A (mais sensível) e outra tipo B (menos sensível), considerando-se os índices de radiação ultravioleta medidos em Natal-RN em 20 de dezembro de 2007, pelo INPE-CRN (ver <http://www.crn2.inpe.br/lavat/>), como igual a 12, a pessoa de pele tipo “A” desenvolveria eritema em apenas 5 minutos de exposição ao Sol, enquanto a pessoa de pele tipo “D” só sofreria o efeito após 25 minutos de exposição. Na figura 2-4 apresentam-se os tempos máximos de exposição em função dos índices de UV-B para os tipos de pele “mais sensível” e “menos sensível”.



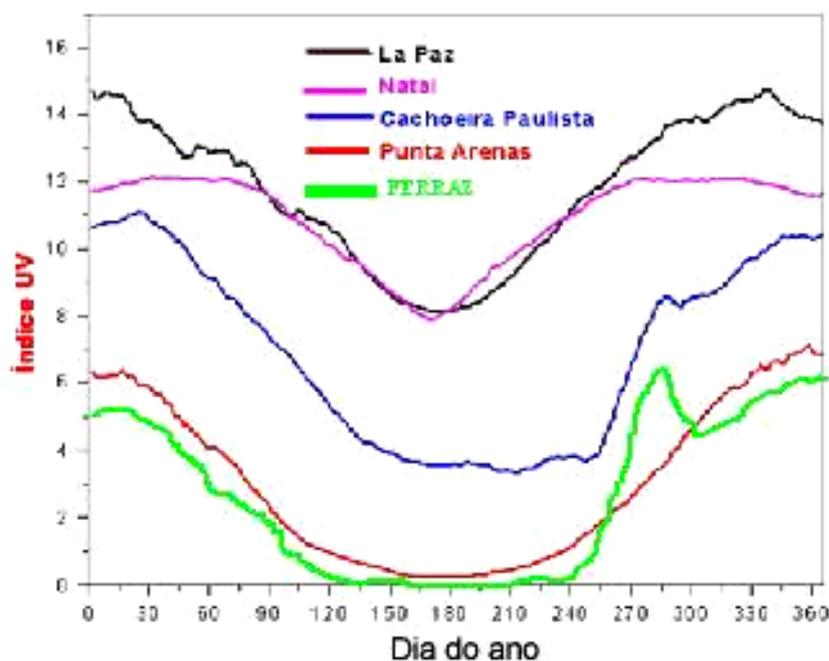
**Figura 2-4: Tempos máximos de exposição para índices de UV-B**

(Fonte: Kirchhoff, 1995).

A capacidade de penetração da RUV na pele humana depende do comprimento de onda. Entre os mecanismos de defesa da pele destacam-se: a melanina, a sudorese, a capa córnea e a defesa imunológica. A melanina, principal defesa contra a RUV, neutraliza os efeitos nocivos dos radicais livres liberados pelas células que sofreram algum dano pela radiação solar. Em função da capacidade de síntese da melanina é que são definidos os seis possíveis tipos de pele humana, de acordo com a escala de *Parrish*. O suor humano contém ácido urânico, que atua como um protetor solar, absorvendo a RUV. A capa córnea (parte mais superficial da pele) tem como função evitar a penetração da RUV até partes mais profundas do organismo. As células queratinócitas, as de Langerhans e as citoquinas (substâncias secretadas pelas células), intervêm nas reações imunológicas que ocorrem na pele. Quando esses mecanismos de defesa se deterioram, ocorre o envelhecimento da pele (ROLLANO, 2002).

Depois da pele, o olho humano é o órgão mais exposto aos efeitos da RUV. Assim como ocorre com a pele, quanto menor o comprimento de onda da radiação maior o dano causado aos olhos (como fotoceratitis, fotoftalmia, fotoconjuntivites, pterigiões, maculopatias, lesões da retina, catarata e câncer). Contudo, em comprimentos de onda maiores (e.g., visível e infravermelho), também existem riscos de danos à estrutura ocular, como lesões da retina, catarata, discromatopsias, opacidade, hemorragias e queimaduras superficiais. A diferença entre os dois casos está no fato de que, enquanto a RIV se manifesta na forma de calor e a luz visível pode ser observada a olho nu, a RUV não provoca nenhuma reação dos órgãos dos sentidos do corpo humano, daí o seu perigo (TAMAYO, 2002).

De acordo com Echer (1999) e Leme (2007), o IUV apresenta valores mais altos para menores latitudes geográficas. Exceção ocorre para a região de La Paz, onde a curva anual de IUV apresenta valores superiores às curvas de outras estações de observações, inclusive da região de Natal, que se encontra bem próxima à linha do equador. O efeito altitude de La Paz torna a radiação mais forte que em latitudes equatoriais. Para Natal, observam-se a ocorrência de dois máximos anuais, associados à dupla passagem à pino do Sol ao longo de um ano (ver fig. 2-5). Na latitude da Estação Antártica Brasileira Comandante Ferraz ( 62°S ; 57°W), ocorre um aumento significativo da radiação UV no período de setembro e outubro, devido a presença do “ Buraco de Ozônio”, podendo alcançar níveis de latitudes médias.

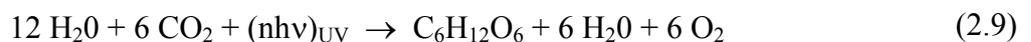


**Figura 2-5: Comparativo do Índice UV em função da latitude geográfica.**

As curvas representam médias de 10 anos de dados (1996 a 2006). Fonte: Neusa Paes Leme, 2007

## 2.7 Radiação Ultravioleta

Os organismos constroem moléculas complexas a partir de substâncias menores e mais simples, disponíveis na biosfera. Sínteses de moléculas de cadeias grandes constituem processos endotérmicos, cuja fonte de energia é o Sol (fotossíntese). Para suprir suas necessidades energéticas, os animais valem-se dos vegetais, únicos capazes de realizar a fotossíntese (ver eq. 2.9, onde  $n.h.v$  é a energia do fóton ultravioleta solar), com destaque para o fato de o oxigênio necessário à vida na Terra vir diretamente da água (PURVES et al, 2002).



Villafañe e Helbling (2002) analisaram os efeitos da RUV no plâncton do lago Titicaca (Bolívia), onde organismos aquáticos que necessitam de níveis de radiação PAR (400 a 700 nm) da ordem de 50 a 60  $\text{W}/\text{m}^2$ , devido às condições geográficas (latitude tropical e 3.810 m de altitude), estão sob estresse óptico, sujeitos a níveis de radiação da ordem de 500  $\text{W}/\text{m}^2$ . Devido à latitude, tanto no período normal como no período de diminuição do ozônio, a concentração do gás apresenta uma média anual de cerca de 255 U.D. Conseqüentemente, a RUV pode causar um impacto adicional aos organismos. Constataram que, devido à RUV, o processo de fotossíntese é fortemente inibido (75%) na superfície do lago, sendo a maior parte do efeito devido à RUV-A, com uma contribuição menor da RUV-B, fato também observado em outras regiões do planeta. Concluíram que o fitoplâncton e o zooplâncton do lago são mais resistente à RUV que os de outras regiões do planeta, apesar de não explicarem as razões para tal comportamento. Especularam poder tratar-se de um mecanismo evolutivo de adaptação.

Tevini e Teramura (1989), Takayanagi et al. (1994) e Searles et al. (1998), *apud* Palenque (2002), provaram que o excesso de RUV-B afeta negativamente o desenvolvimento das plantas. Palenque (2002) relatou que as plantas desenvolvem mecanismos de auto-proteção quando sob excesso de RUV, por exemplo, produzindo substâncias (carotenóides e flavonoides) que tornam o citoplasma mais opaco à RUV, protegendo a informação genética. Destacou que, no caso de vegetais domesticados para produção de alimentos, particularmente a “quinua”, a formação de substâncias protetoras, similares à melanina cutânea produzida por humanos, constitui um desvio de recursos alimentícios e energéticos pelos vegetais, aumentando o tempo requerido para o pleno desenvolvimento e o tempo para maturação dos frutos, implicando em frutos com menores quantidades de açúcares e de proteínas.

## 2.8 Efeitos da RUV nos Materiais

Na ausência de radiação solar, a maioria dos polímeros é estável. Quando submetidos à RUV, sofrem fotólise e foto-oxidação (modificações irreversíveis nas propriedades físico-químicas). A fotólise causa a insaturação do polímero, enquanto a foto-oxidação leva à produção de aldeídos, cetonas e ácidos carboxílicos (GRASSIE, 1985). O UV-A (320 nm a 400 nm) pode causar fluorescência e reações fotoquímicas em alguns materiais, o que possibilita uma ampla gama de aplicações industriais. Na indústria têxtil, fibras sintéticas ou naturais podem melhorar a aderência da interface fibra/matriz quando expostas à RUV (KAFI e ABEDIN, 2006). Devido à sua forte ação bactericida, a radiação UV-C (100 nm a 280 nm) é amplamente empregada em dispositivos para assepsia.

Palenque (2002) analisou os efeitos da RUV em plásticos de coberturas e cabos de eletricidade nos Andes (radiação entre 850 e 890 W/m<sup>2</sup> e temperaturas menores que 15°C). Constatou a deterioração de propriedades mecânicas (tornando-os mais frágeis e quebradiços) e ópticas (embranquecendo-os e tornando-os opacos à radiação visível). Identificou que, materiais como base em polietileno deterioram devido à cristalização da cadeia polimérica e à perda de grupos secundários, resultando no “envelhecimento” do material, que aumenta a opacidade à radiação visível e a transparência à RUV. Na figura 2-6 observa-se uma câmara de ultravioleta do PPGEM-UFRN, utilizada em testes de envelhecimento de materiais em pesquisas do, onde em 2007 foi desenvolvido o trabalho *Efeitos do envelhecimento ambiental acelerado em compósitos poliméricos*, do Eng. Leonardo Rodrigues. Outros projetos em andamento contam com apoio de fabricantes de tubulações.



Figura 2-6: Câmara de ultravioleta, instalada no Lab. de Transferência de Calor – UFRN.

## CAPÍTULO 3

### 3 Metodologia

Esta é uma pesquisa de caráter descritivo, onde são descritos fenômenos observados, avaliadas variáveis e estabelecidas relações entre elas visando corroborar ou rejeitar hipóteses levantadas, caracterizando-se também por ser uma pesquisa de caráter temporal de natureza longitudinal, uma vez que são consideradas as observações realizadas e analisadas pelo autor. Neste sentido, levantam-se hipóteses que podem ser comprovadas ou rejeitadas mediante aplicação de teste estatístico paramétrico (RODRIGUES, 1986); são elas:

– hipótese nula:

$H_0$ : não existe diferença significativa nas variações de intensidade da RUV no período de janeiro de 2001 a dezembro de 2007 entre os comprimentos de ondas de 305 nm, 320 nm, 340 nm e 380 nm e a Dose;

– hipóteses alternativas:

$H_1$ : existe diferença significativa na variação da intensidade da RUV para o comprimento de onda 305 nm no período de janeiro de 2001 a dezembro de 2007;

$H_2$ : existe diferença significativa na variação da intensidade da RUV para o comprimento de onda 320 nm no período de janeiro de 2001 a dezembro de 2007;

$H_3$ : existe diferença significativa na variação da intensidade da RUV para o comprimento de onda 340 nm no período de janeiro de 2001 a dezembro de 2007;

$H_4$ : existe diferença significativa na variação da intensidade da RUV para o comprimento de onda 380 nm no período de janeiro de 2001 a dezembro de 2007;

$H_5$ : existe diferença significativa na variação da intensidade da RUV para Dose no período de janeiro de 2001 a dezembro de 2007;

#### 3.1 População alvo do estudo

Trata-se de um estudo censitário, baseado na análise dos dados coletados sobre RUV nos canais do GUV correspondentes aos comprimentos de ondas eletromagnéticas de 305 nm, 320 nm, 340 nm, 380 nm e Dose, no período de janeiro de 2001 a dezembro de 2007 (BISQUERRA, 1989; REA e PARKER, 2002).

### 3.2 Universo de Estudo

O estudo foi realizado no LAVAT-INPE-CRN, localizado em Natal–RN–Brasil, cidade situada na latitude  $5^{\circ} 45' 54''$  Sul e longitude  $35^{\circ} 12' 05''$  Oeste (ver Fig. 3-1), com área de 17,298 km<sup>2</sup> e população de 790.000 habitantes (dados do Censo de 2007), clima quente e úmido, temperatura média de 26°C, ventos moderados predominantes de Sudeste, com cerca de 2.184,80 horas anuais de insolação e nebulosidade média de 6,2 (em uma escala de 1 a 10, segundo MASCARO, 1991, *apud* ARAÚJO, 1996), elevada intensidade da radiação solar (pois a trajetória aparente do Sol varia de  $65^{\circ}$  a  $90^{\circ}$ ), em grande parte difusa e com alta luminosidade. Portanto, torna-se relevante estudar a RUV que atinge a cidade.



Figura 3-1: Representação da localização da cidade de Natal-RN–Brasil.

### 3.3 Instrumentação

Utilizou-se um radiômetro de superfície GUV (ground-based ultraviolet radiometer), modelo 511-C, que mede a radiação nos comprimentos de 305 nm, 320 nm, 340 nm e 380 nm corrigida pelo cosseno do ângulo solar zenital, com sensores montados em alojamento isolado, dotado de controlador de temperatura que mantinha a operação em  $50^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ , garantindo a integridade do medidor, instalado no teto do LAVAT-INPE-CRN (ver Fig. 3-2). Os dados foram coletados e gravados a cada cinco minutos, diariamente, das 05h00 às 18h00 (horário local) e registrados em computador. A irradiância foi obtida em  $\mu\text{Wcm}^{-2}\text{nm}^{-1}$ . As incertezas de medição foram:  $\pm 1$  nm em 305 e  $\pm 2$  nm em 320, 340 nm e 380 nm. As incertezas de larguras de banda foram:  $7 \pm 1$  nm em 305 nm,  $11 \pm 1$  nm em 320 nm,  $10 \pm 1$  nm em 340 nm e  $10 \pm 1$  nm em 380 nm.



**Figura 3-2: Sensor do GUV instalado no teto do LAVAT-INPE-RN**



**Figura 3-3: Calibração de GUVs no Laboratório de Ozônio, INPE – S.J.Campos – SP.**

Para obtenção da dose “Diffey” ou índice de UV, a Biospherical Instruments Inc., fabricante do equipamento, criou uma biblioteca de dados com 5147 varreduras espectrais, gravados em San Diego – Califórnia entre 28/12/1992 e 11/01/1994, feitas a partir de um espectralradiômetro de varredura SUV-100, da National Science Foundation’s Network (NSF), para monitoramento da Irradiância UV em regiões polares, considerando-se observações com ângulo solar zenital menor que 90°. Nenhuma escolha ou processo de filtragem foi aplicado além do processamento de rotina dos dados e procedimentos de controle de qualidade descritos nos relatórios de operação da rede de espectralradiômetros de UV da NSF. Um parâmetro SUV medido foi definido como “dose-3” e convertido para Dose-EPA, multiplicado por 0,36 (3.600 segundos / hora x 10<sup>-4</sup> m<sup>2</sup> por cm<sup>2</sup>). Para converter a irradiância determinada pelo GUV em “dose Diffey” ou “Índice de UV”, a irradiância espectral gravada pelo SUV foi integrada, conforme definição de Dose da CIE. A biblioteca com os dados das irradiâncias medidos pelo GUV foi compilada e examinada por métodos de regressão linear múltipla, chegando-se à equação 3.1, que define a taxa de dose biológica (D<sub>G</sub>) das irradiâncias medidas pelo GUV (E<sub>305</sub>, E<sub>320</sub> e E<sub>340</sub>). A regressão produziu R<sup>2</sup> = 0.99925, indicando boa concordância (Biospherical Instruments Inc., 2000).

$$D_B = a_1*(E_{305}) + a_2*(E_{320}) + a_3*(E_{340}) \quad (3.1)$$

Os coeficientes (a<sub>1</sub> = 0,89267, a<sub>2</sub> = 0,081228 e a<sub>3</sub> = 0,007954) foram determinados na calibração do equipamento (ver Fig. 3-3). Portanto, a DOSE ERITÊMICA para o GUV do LAVAT-INPE-RN (nº. série 9285) pode ser determinada a partir da seguinte relação:

$$D_B = 0,89267*(E_{305}) + 0,081228*(E_{320}) + 0,007954*(E_{340}) \quad (3.2)$$

A calibração é feita após horas ou dias sob condições meteorológicas favoráveis, comparando-se os dados para posterior cálculo das constantes por regressão linear. A calibração do GUV do LAVAT-INPE-RN foi feita na fábrica, em 23/05/2001. Após essa data, intercomparações periódicas com outros GUVs têm sido feitas em São Paulo (ver fig. 3-3).

### 3.4 Procedimentos de Coleta de dados

As medições da RUV foram efetuadas diariamente, no intervalo das 05h00 às 18h00, horário local, por meio de um programa específico desenvolvido pelo fabricante do instrumento, em ambiente Windows, e gravados em computador (ver fig. 3.4).



Figura 3-4: GUV do LAVAT-INPE-CRN.

### 3.5 Tratamento estatístico

Os dados coletados foram submetidos a uma análise de variância, utilizando-se o programa “ANOVA”, com  $p < 0,05$ , uma vez que foram comparadas as médias dos meses e dos anos com relação à RUV nos canais respectivos aos comprimentos de ondas de 305 nm, 320 nm, 340 nm, 380 nm e dose (RODRIGUES, 1986).

Análise de variância é um método estatístico utilizado para testar hipóteses de que três ou mais populações tenham a mesma média. Sua estrutura gráfica apresenta-se do tipo uni-

caudal, portanto não havendo uma simetria com relação ao nível de significância (MAGALHÃES, 2005).

### 3.6 Demonstrativo da Análise de Variância (ANOVA)

Na tabela 3-1 vê-se o resumo de uma planilha de cálculo de análise de variância

Tabela 3-1: Planilha demonstrativa da Análise de Variação para  $\lambda = 305 \text{ nm}$ .

2001		2002		2003		2004		2005		2006		2007					
$X_i$	$(\mu - X_i)^2$	$X_i$	$(\mu - X_i)^2$	$X_i$	$(\mu - X_i)^2$	$X_i$	$(\mu - X_i)^2$	$X_i$	$(\mu - X_i)^2$	$X_i$	$(\mu - X_i)^2$	$X_i$	$(\mu - X_i)^2$				
8,49	0,39	6,553	1,53	6,77137	1,57	5,961	2,51	6,6	1,61	6,296	1,65	6,5	2,03				
8,91	1,09	6,315	2,18	5,82105	4,85	6,496	1,10	6,8	1,07	4,137	11,87	6	3,82				
8,68	0,67	8,47	0,46	8,31	0,08	8,51	0,93	7,88	0,00	8,22	0,41	6,30	2,72				
8,54	0,46	8,29	0,25	7,98	0,00	8,18	0,40	8,52	0,47	8,62	1,07	7,87	0,01				
						7,83	0,03										
$\mu$	Somat.	$\mu$	Somat.	$\mu$	Somat.	$\mu$	Somat.	$\mu$	Somat.	$\mu$	Somat.	$\mu$	Somat.				
7,86	152,97	7,79	582,79	8,02	619,75	7,55	951,89	7,83	953,85	7,58	799,77	7,95	713,97				
<b>SQD</b>		<b>4774,99</b>															
2001		2002		2003		2004		2005		2006		2007					
$X_i$	$(\mu - X_i)^2$	$X_i$	$(\mu - X_i)^2$	$X_i$	$(\mu - X_i)^2$	$X_i$	$(\mu - X_i)^2$	$X_i$	$(\mu - X_i)^2$	$X_i$	$(\mu - X_i)^2$	$X_i$	$(\mu - X_i)^2$				
8,49	0,49	6,55	1,53	6,77	1,04	5,96	3,35	6,56	1,51	6,30	2,23	6,53	1,60				
8,91	1,25	6,31	2,18	5,82	3,88	6,50	1,68	6,80	0,99	4,14	13,36	6,00	3,22				
8,68	0,79	8,47	0,46	8,31	0,27	8,51	0,51	7,88	0,01	8,22	0,18	6,30	2,22				
8,54	0,56	8,29	0,25	7,98	0,04	8,18	0,15	8,52	0,53	8,62	0,68	7,87	0,01				
						7,83	0,00										
$\mu_0$	Somat.	$\mu_0$	Somat.	$\mu_0$	Somat.	$\mu_0$	Somat.	$\mu_0$	Somat.	$\mu_0$	Somat.	$\mu_0$	Somat.				
7,79	153,97	7,79	582,79	7,79	637,76	7,79	973,34	7,79	954,43	7,79	815,70	7,79	723,12				
<b>SQT</b>		<b>4841,12</b>															
ANOS: 2001-2007																	
SQD	SQE	QME	QMD	GRAUS DE LIBERDADE		NÍVEL DE SIGNIFICÂNCIA		F		F							
				ENTRE	6	(p)		Calculado		Tabelado							
				DENTRO	2282												
4774,99	66,13	11,02	2,09			0,05		5,27		2,099							

Na tabela 3-2 vê-se o resumo da análise de variância, onde “k” é a quantidade de anos e “n” é o número de amostras.

Tabela 3-2: Resumo da Análise de Variância (ANOVA)

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	$F_{\text{Calc.}}$
Entre	k - 1	SQE	QME	QME / QMD
Dentro	n - k	SQD	QMD	
Total		SQT		

Na tabela 3-3 estão os resultados dos cálculos para  $\lambda = 305$  nm, onde se usou a ANOVA para comprovação da hipótese  $H_1$  e foram analisados 2289 amostras (ver tab. 7-1, Anexos). O modelo de planilha de cálculo foi aplicado para os demais comprimentos de ondas e para o índice de UV.

**Tabela 3-3: Resultados dos cálculos da ANOVA para o canal 305 nm**

<b>Fonte de Variação</b>	<b>Graus de Liberdade</b>	<b>Soma de Quadrados</b>	<b>Quadrado Médio</b>	<b>F<sub>Calc.</sub></b>
Entre	6	66,05	11,01	5,27
Dentro	2246	4.775,07	2,09	-
Total		4.841,12		

Foi adotado o seguinte procedimento de cálculo:

- 1) determinava-se a média aritmética ( $\mu$ ) da amostra de um determinado ano, e.g., para 2001 obteve-se  $\mu = 7,86$  e assim para todo o intervalo 2001 – 2007;
- 2) determinava-se o valor de  $(\mu - X_i)^2 = (7,86 - 8,49)^2 = 0,14$  e repetia-se para o intervalo;
- 3) fazia-se o somatório dos quadrados,  $(\mu - X_i)^2 = 152,97$  e repetia-se para o intervalo;
- 4) calculava-se SQD, soma dos quadrados dentro das classes,  $SQD = 4.774,99$ ;
- 5) calculava-se  $\mu_0$ , média aritmética de todos os valores diários do intervalo  $\rightarrow \mu_0 = 7,79$ ;
- 6) repetia-se o passo 2,  $(\mu - X_i)^2 = (7,79 - 8,49)^2 = 0,49$  e assim para todos os dias;
- 7) repetia-se o passo 3,  $(\mu_0 - X_i)^2 = 153,97$ ;
- 8) calculava-se SQT, soma dos quadrados total  $\rightarrow SQT = 4.841,12$ ;
- 9) calcula-se SQE, soma dos quadrados entre as classes  $\rightarrow SQE = SQT - SQD = 4.841,12 - 4.774,99 = 66,13$ ;
- 10) calculava-se QME, quadrado médio entre as classes  $\rightarrow QME = SQE / \text{graus de liberdade entre} = 66,06 / (7-1) = 11,02$ ;
- 11) calculava-se QMD, quadrado médio dentro das classes  $\rightarrow QMD = SQD / \text{graus de liberdade dentro} = 4.774,99 / (2289-7) = 2,09$ ;
- 12) calculava-se  $F_{calc} = QME / QMD = 11,02 / 2,09 = 5,27$ ;

13) por meio da distribuição de Fisher (ver tab. 7-12, Anexos), com 6 e 2282 graus de liberdade, considerando-se  $p = 5\%$ , obtinha-se  $F_{\text{tab.}} = 2,099$ , com  $F_{\text{calc.}} = 5,27 > F_{\text{tab.}}$ .

Conclui-se que, dentro do nível de significância de 5%, as médias dos dados eram diferentes, confirmando a hipótese levantada para  $\lambda = 305 \text{ nm}$ . Aplicou-se o procedimento para testar as hipóteses levantadas para os outros comprimentos de ondas e a Dose eritêmica

## CAPÍTULO 4

### 4 Resultados e Análises

Neste capítulo são apresentados gráficos e tabelas com dados de 2.289 amostras de irradiâncias obtidas para  $\lambda = 305$  nm; 2.289 para  $\lambda = 320$  nm; 2.289 para  $\lambda = 340$  nm; 2.289 para  $\lambda = 380$  nm e 2.286 para a Dose, conforme se observa nas tabelas 4-1 a 4-5.

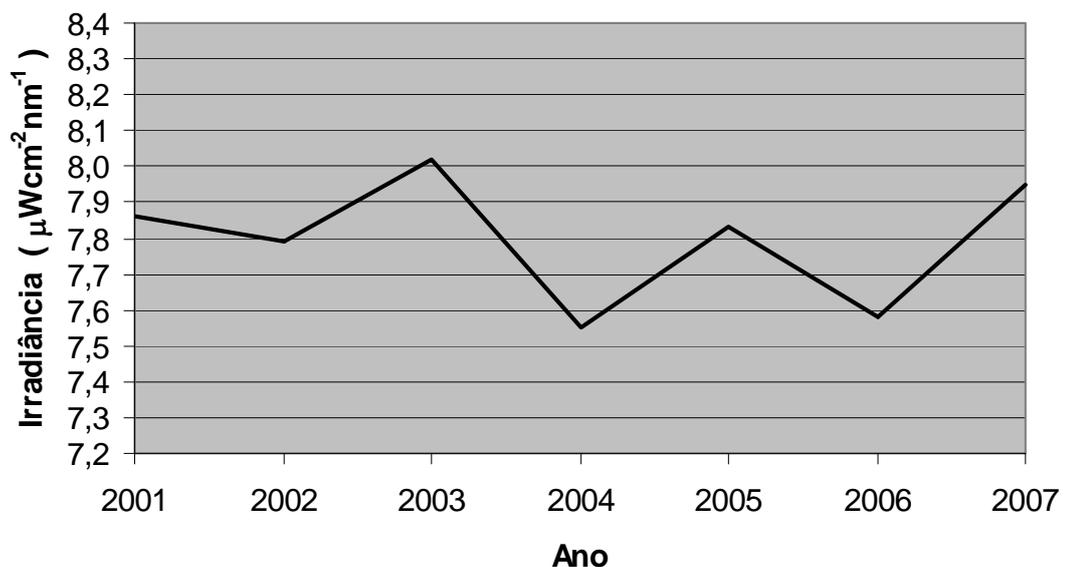
**Tabela 4-1 Análise de variância com médias anuais de 01/2001 a 12/2007 para  $\lambda = 305$  nm.**

SQD	SQE	QME	QMD	Graus de Liberdade		Nível Sign. (p)	F Calc.	F Tab.
				entre	6			
7.909,06	66,13	11,02	2,09	dentro	2.282	0,05	5,27	2,099

onde:

SQD = soma dos quadrados dentro das classes; SQE = soma dos quadrados dentro das classes; QME = quadrado médio entre as classes e QMD = quadrado médio dentro das classes.

Na figura 4-1 vêem-se os valores médios máximos de irradiância em função do ano para  $\lambda = 305$  nm.



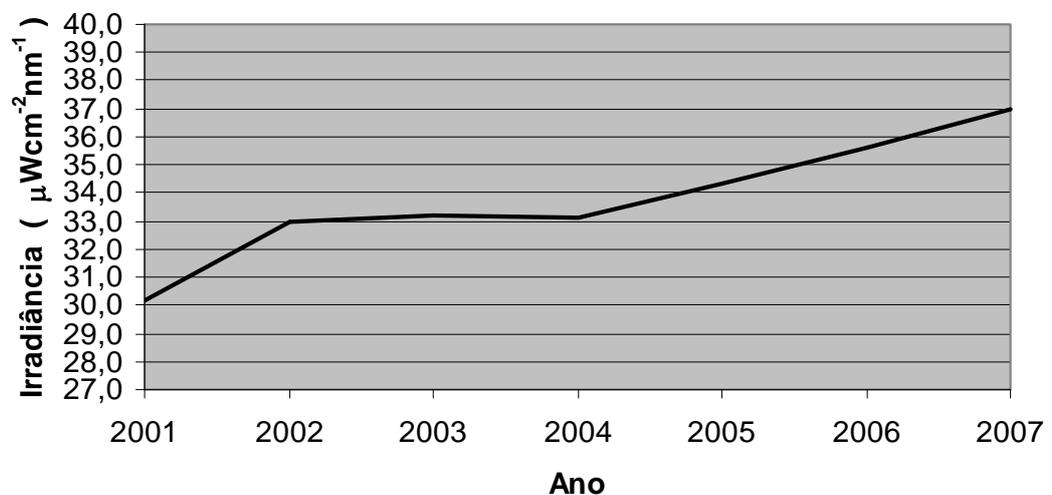
**Figura 4-1: Variação da intensidade da RUV para  $\lambda = 305$  nm entre 01/2001 e 12/2007.**

Na figura 4-1 percebe-se uma diminuição de  $-0,07$  da irradiância entre janeiro de 2001 e janeiro de 2002. A partir de 2002, ocorreram variações que, aparentemente, apresentaram uma tendência de picos em anos ímpares e queda em anos pares. A maior diferença registrada entre máximo e mínimo foi de  $-0,47 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}$ , entre 2003 e 2004. Diversos fatores podem ter contribuído para esse comportamento, como a variação da umidade no período ou a quantidade de nuvens no céu. Dos comprimentos de onda analisados, em  $\lambda = 305 \text{ nm}$  observou-se a menor irradiância, porém deve ser lembrado que nessa região a radiação tem maior poder de penetração no tecido humano. É importante observar que, no período analisado (2001 a 2007), os valores foram sempre elevados. Na tabela 4-2 apresentam-se os resultados da análise de variância para amostras  $\lambda = 320 \text{ nm}$ .

**Tabela 4-2: Análise de variância com médias dos máximos anuais de 01/2001 a 12/2007 para  $\lambda = 320 \text{ nm}$ .**

SQD	SQE	QME	QMD	Graus de Liberdade		Nível Sign. (p)	F Calc.	F Tab.
				entre	6			
54.353,40	7.798,83	1.299,81	23,82	dentro	2282	0,05	54,57	2,099

Na figura 4-2 vêem-se os valores médios de irradiância em função do ano para  $\lambda = 320 \text{ nm}$ .



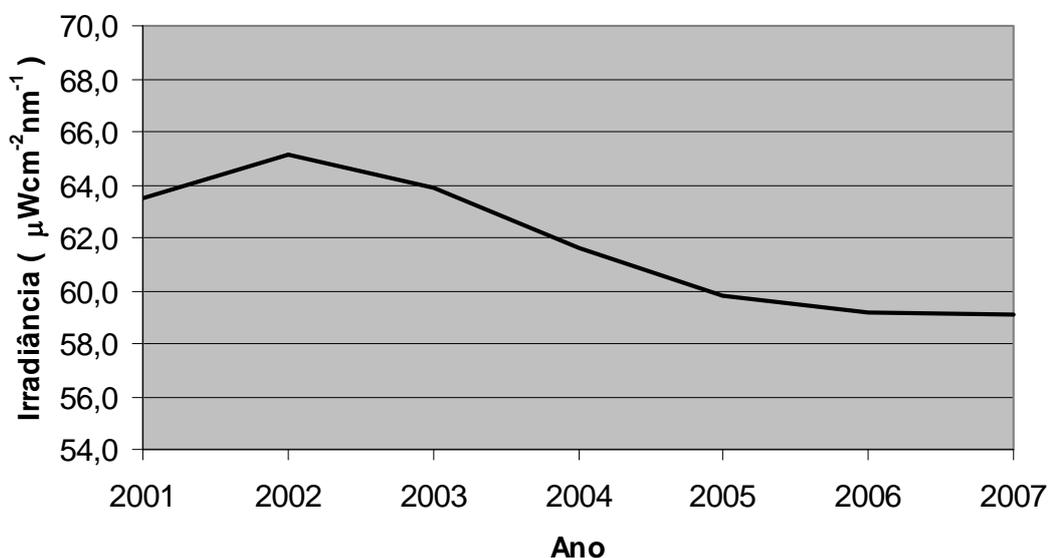
**Figura 4-2: Variação da intensidade da RUV para  $\lambda = 320 \text{ nm}$  entre 01/2001 e 12/2007**

Na figura 4-2 percebe-se um aumento significativo ( $2,84 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}$ ) da irradiância em  $\lambda = 320 \text{ nm}$  entre 2001 e 2002. Entre 2002 e 2004 houve um período de estabilidade na RUV, que apresentou uma variação média de cerca de  $0,19 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}$ . A partir de 2004, houve um aumento contínuo de aproximadamente  $1,28 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}$  por ano, até 2007, sendo a variação total de  $6,78 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}$ .

Na tabela 4.3 apresentam-se os resultados da análise de variância para amostras  $\lambda = 340 \text{ nm}$ . Na figura 4-3 vê-se o gráfico dos valores médios dos máximos de irradiância em função do ano para  $\lambda = 340 \text{ nm}$ .

**Tabela 4-3: Análise de variância com médias dos máximos anuais de 01/2001 a 12/2007 para  $\lambda = 340 \text{ nm}$ .**

SQD	SQE	QME	QMD	Graus de Liberdade		Nível Sign. (p)	F Calc.	F Tab.
				entre	6			
150.053,61	12.178,77	2.029,79	65,76	dentro	2.282	0,05	30,87	2,099



**Figura 4-3: Variação da intensidade da RUV para  $\lambda = 340 \text{ nm}$  entre 01/2001 e 12/2007.**

Na figura 4-3 vê-se que a RUV para  $\lambda = 340 \text{ nm}$  aumentou entre 2001 e 2002 em cerca de  $1,67 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}$ . Entre 2002 e 2006, houve uma redução progressiva da irradiância, caindo em  $1,29 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}$  entre 2002 e 2003;  $2,24 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}$  de 2003 a 2004;  $1,84 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}$  de 2004 a 2005 e  $0,67 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}$  de 2005 a 2006.

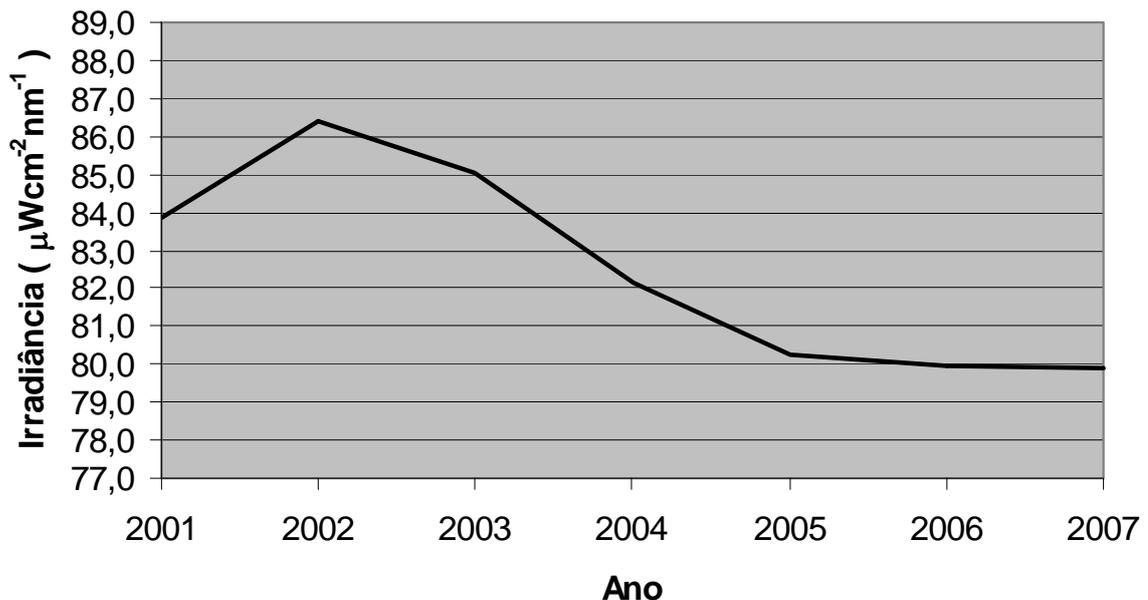
Entre 2006 e 2007 a radiação ficou quase constante, caindo  $0,05 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}$ . A variação total da irradiância entre 2002 e 2007 foi de  $-6,05 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}$ .

Na tabela 4-4 vêem-se os resultados da análise de variância para amostras  $\lambda = 380 \text{ nm}$ .

**Tabela 4-4: Análise de variância com médias dos máximos anuais de 01/2001 a 12/2007 para  $\lambda = 380 \text{ nm}$ .**

SQD	SQE	QME	QMD	Graus de Liberdade		Nível Sign. (p)	F Calc.	F Tab.
				entre	6			
272.232,09	14.095,72	2.349,29	119,30	dentro	2.282	0,05	19,69	2,099

Na figura 4-4 vê-se o gráfico dos valores médios dos máximos de irradiância em função do ano para  $\lambda = 380 \text{ nm}$ .



**Figura 4-4: Variação da intensidade da RUV para  $\lambda = 380 \text{ nm}$  entre 01/2001 e 12/2007.**

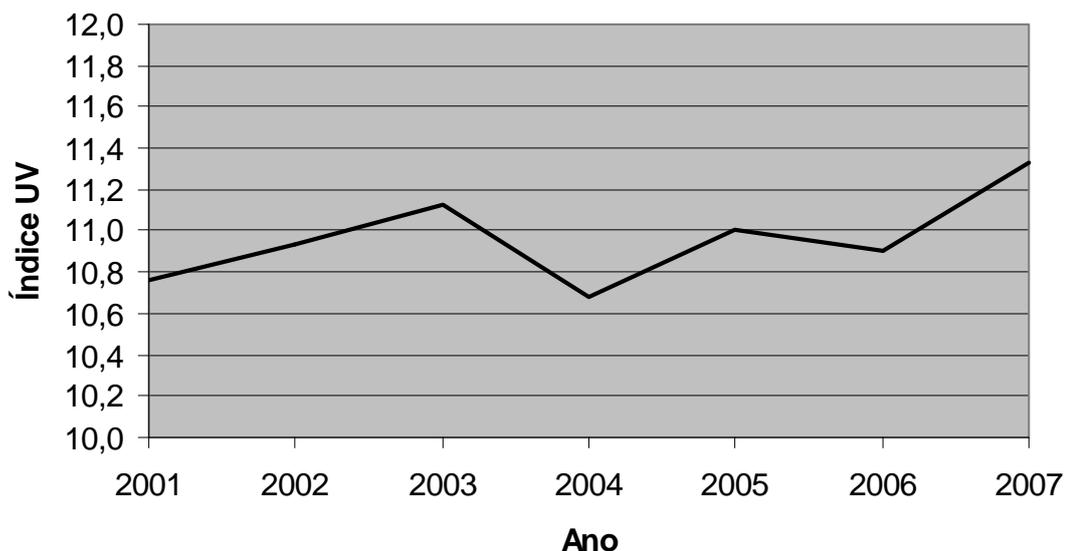
Vê-se na figura 4-4 que a radiação em  $\lambda = 380 \text{ nm}$  teve um comportamento próximo daquele obtido para  $\lambda = 340 \text{ nm}$  (exceto pelo valor absoluto da irradiância). De 2001 a 2002 a RUV em  $\lambda = 380 \text{ nm}$  aumentou de  $2,51 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}$ ; reduziu de  $1,36 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}$  entre 2002 e 2003; entre 2003 e 2004 reduziu de  $2,85 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ ; entre 2004 e 2005 reduziu de  $1,94$ ; entre 2005 reduziu de  $0,27 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}$  e entre 2006 e 2007 a variação foi insignificante ( $-0,09 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}$ ). A variação total da RUV entre 2002 e 2007 foi de  $7,81 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}$ .

Na tabela 4-5 apresentam-se os resultados da análise de variância para amostras de dose eritêmica.

**Tabela 4-5: Análise de variância com médias dos máximos anuais de 01/2001 a 12/2007 para dose.**

SQD	SQE	QME	QMD	Graus de Liberdade		Nível Sign. (p)	F Calc.	F Tab.
				entre	6			
7.909,06	97,96	16,33	3,47	dentro	2.279	0,05	4,70	2,099

Na figura 4-5 vê-se o gráfico dos valores médios dos máximos do índice de ultravioleta em função do ano.



**Figura 4-5: Variação do IUV entre 01/2001 e 12/2007.**

Comparando-se o comportamento da curva da figura 4-5 para dose eritêmica (IUV) como a curva da RUV para  $\lambda = 305 \text{ nm}$  (figura 4-1), constatou-se uma semelhança aproximada entre os máximos e mínimos. Assim, a partir de 2003 o IUV apresenta tendência de máximo em anos ímpares e mínimos em anos pares, exceto em 2001. Entre 2001 e 2002 houve um aumento de 0,17; entre 2002 e 2003 o aumento foi de 0,20; de 2003 a 2004 o IUV caiu 0,45; de 2004 a 2005 aumentou de 0,33; de 2005 a 2006 houve queda de 0,11 e de 2006 a 2007 aumentou 0,43. Entre 2001 e 2007 houve um aumento do IUV de 0,57. Independente do ano considerado, analisando-se a figura 4-5 percebeu-se que o valor médio da dose eritêmica em Natal permaneceu sempre entre MUITO ALTO e EXTREMO.

Nas figuras 4-6 a 4-10 são apresentados os valores médios mensais da RUV em Natal-RN entre 01/2001 e 12/2007. A linha mais espessa (preta) representa a média aritmética dos valores máximos para cada comprimento de onda e para a DOSE, no mesmo período.

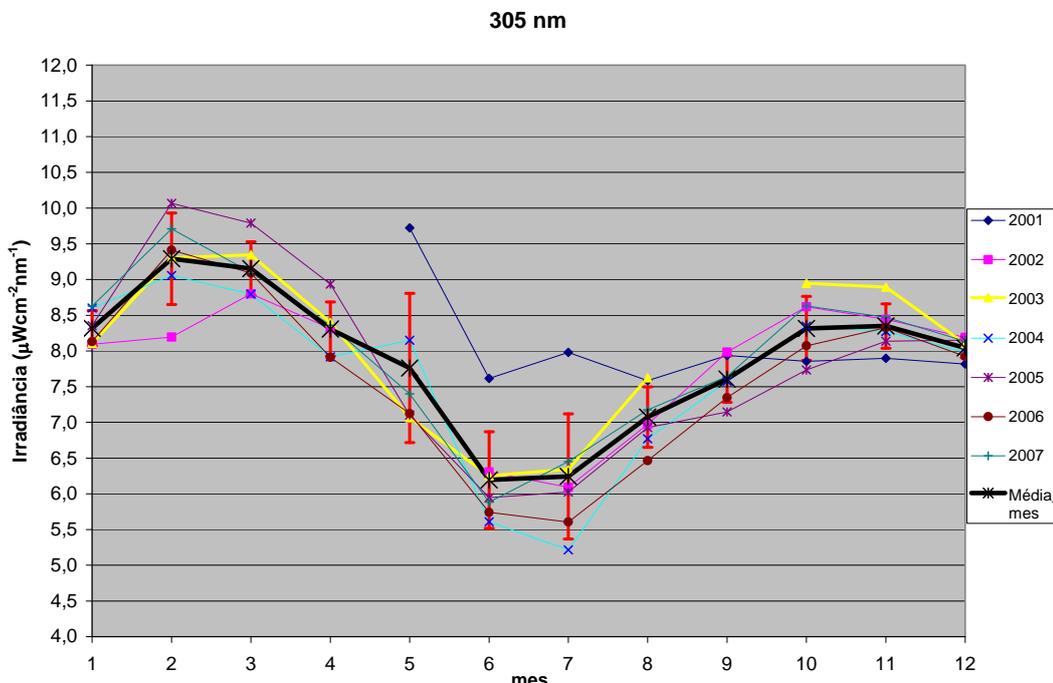


Figura 4-6: Média dos máximos mensais da RUV em  $\lambda = 305 \text{ nm}$  entre 01/2001 e 12/2007 (média do período com linha preta e desvio padrão com linha vermelha).

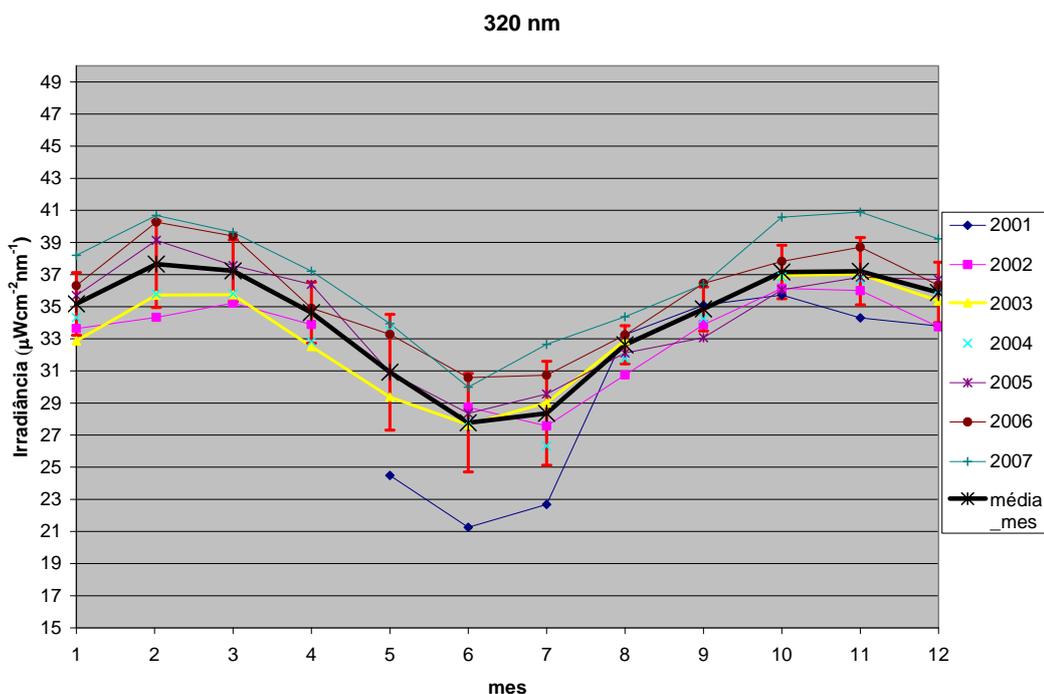


Figura 4-7: Média dos máximos mensais da RUV em  $\lambda = 320 \text{ nm}$  entre 01/2001 e 12/2007 (média do período com linha preta e desvio padrão com linha vermelha).

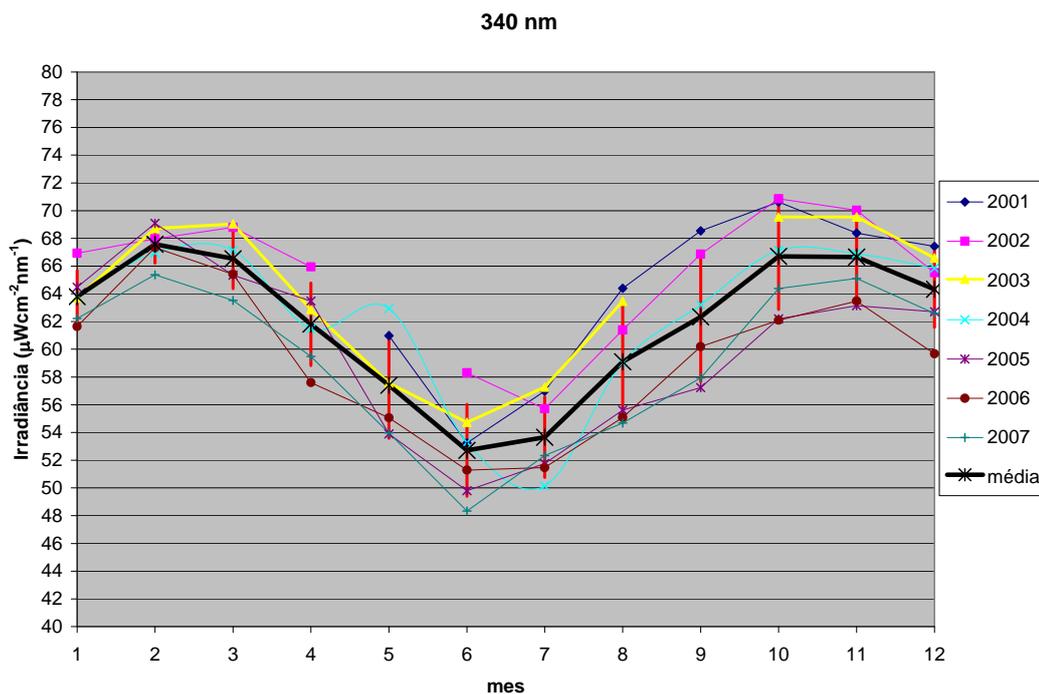


Figura 4-8: Média dos máximos mensais da RUV em  $\lambda = 340 \text{ nm}$  entre 01/2001 e 12/2007

(média do período com linha preta e desvio padrão com linha vermelha).

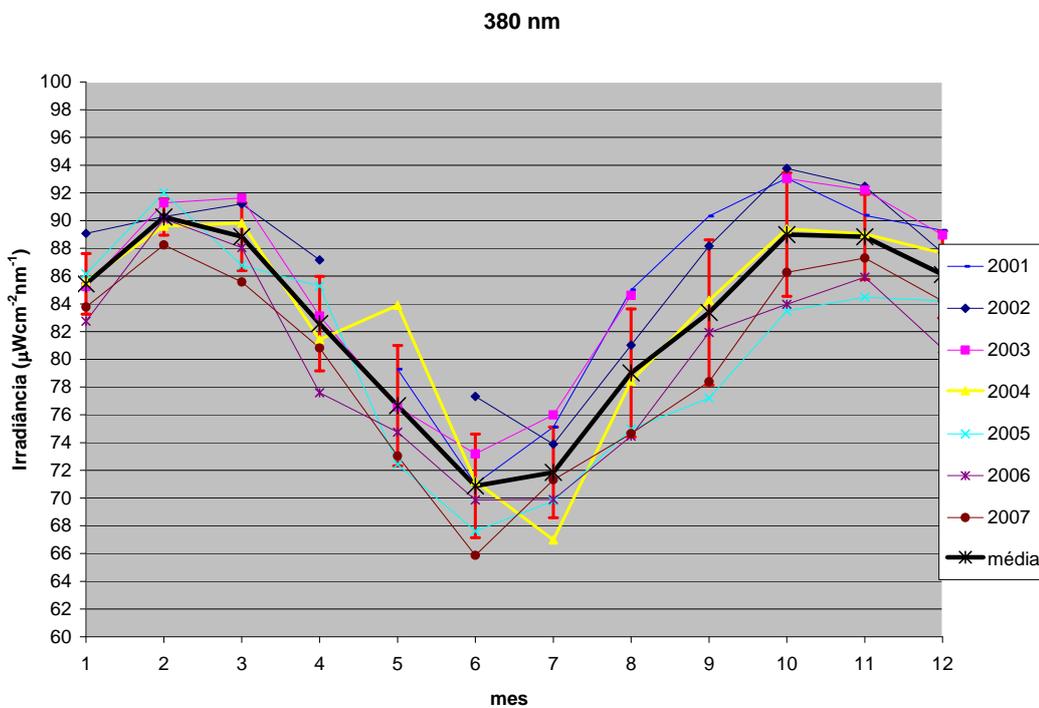
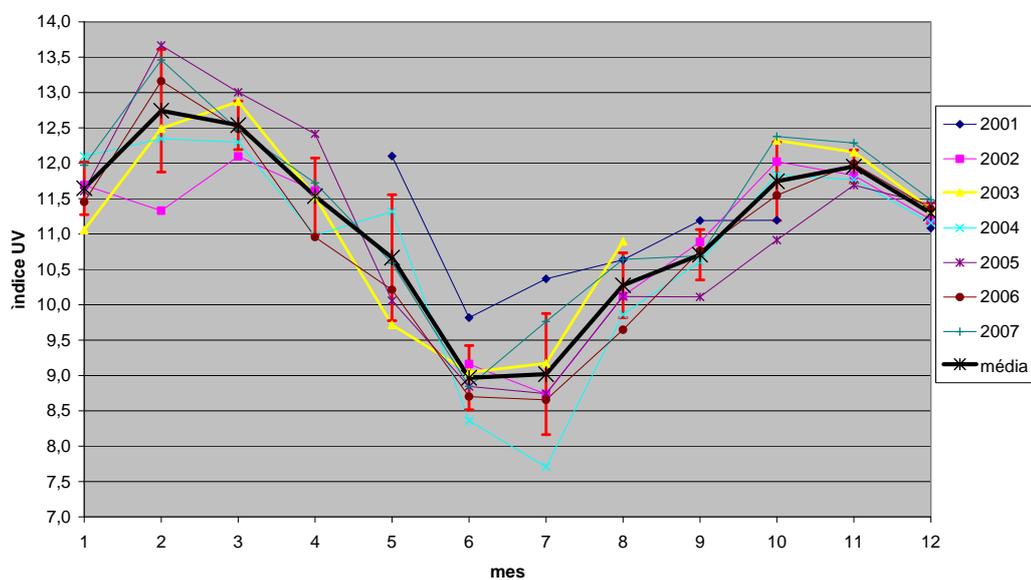


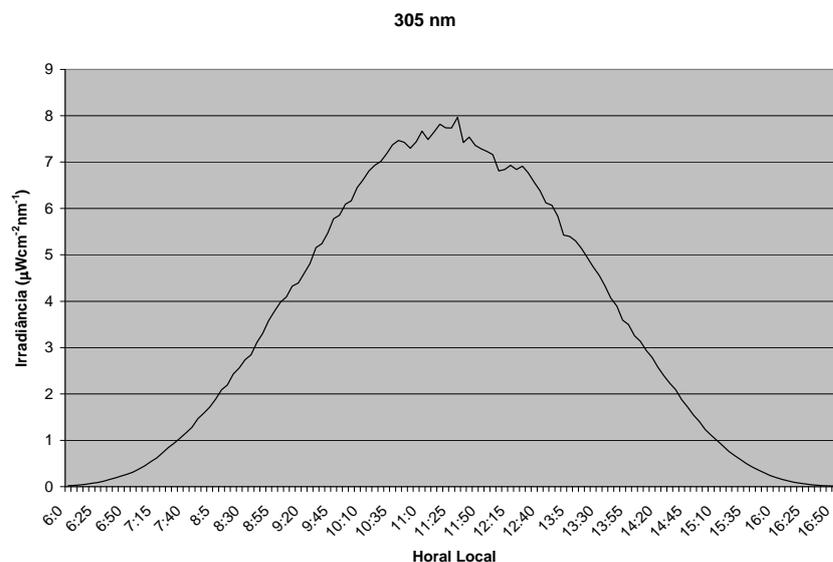
Figura 4-9: Média dos máximos mensais da RUV em  $\lambda = 380 \text{ nm}$  entre 01/2001 e 12/2007

(média do período com linha preta e desvio padrão com linha vermelha).

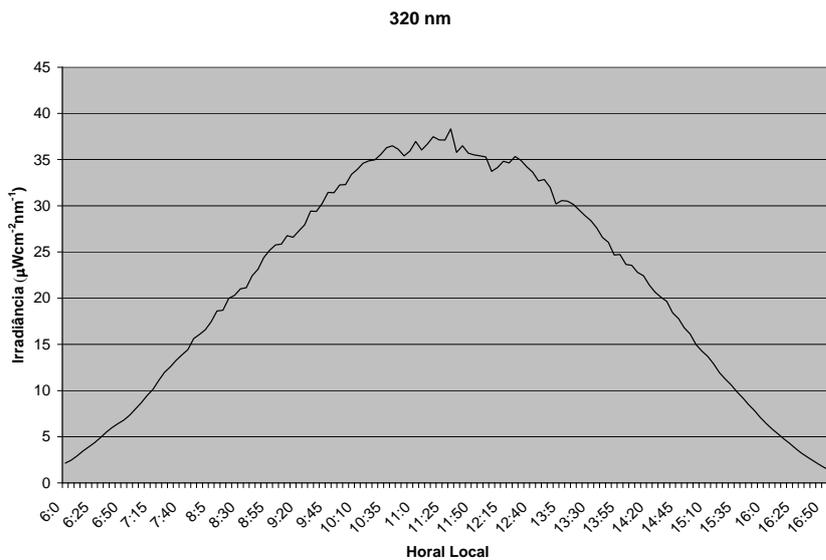
Na figuras 4-6 a 4-9 viu-se que, para todos os comprimentos de onda considerados, houve um pico de RUV entre fevereiro e março, um mínimo entre junho e julho e outro pico entre outubro e novembro, todos coincidindo com as variações da inclinação da Terra em sua órbita ao redor do Sol. Na figura 4-10 observam-se as médias mensais dos índices UV, determinadas de 2001 a 2007. As variações do IUV acompanharam a tendência observada nos resultados apresentados nas figuras 4-6 a 4-9. Mesmo no período de mínimo (entre os meses de junho e julho), o valor do IUV manteve-se em MUITO ALTO, exceto em 2004, onde a média do IUV correspondeu à categoria de ALTO. Nas figuras 4-11 a 4-14 e 4-16 apresentam-se as médias diárias da RUV e do IUV em Natal-RN no período 2001 - 2007.



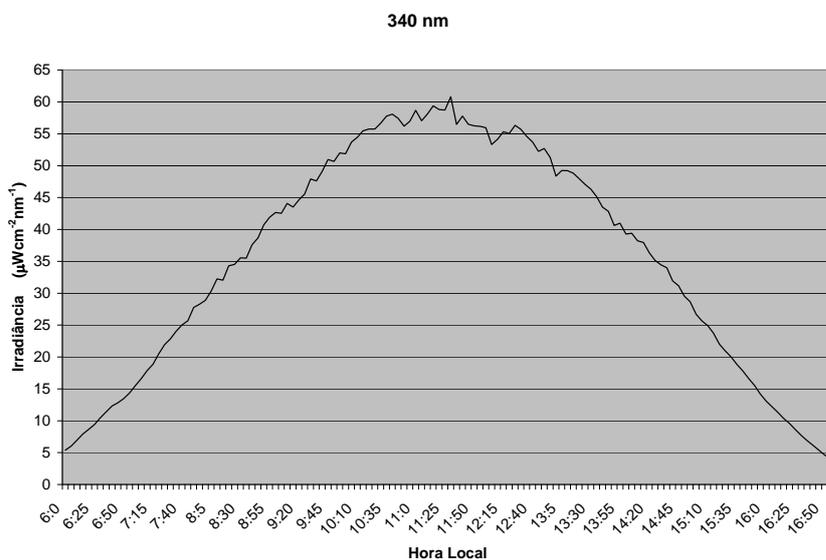
**Figura 4-10: Médias dos máximos mensais do IUV entre 01/2001 e 12/2007 (média do período com linha preta e desvio padrão com linha vermelha).**



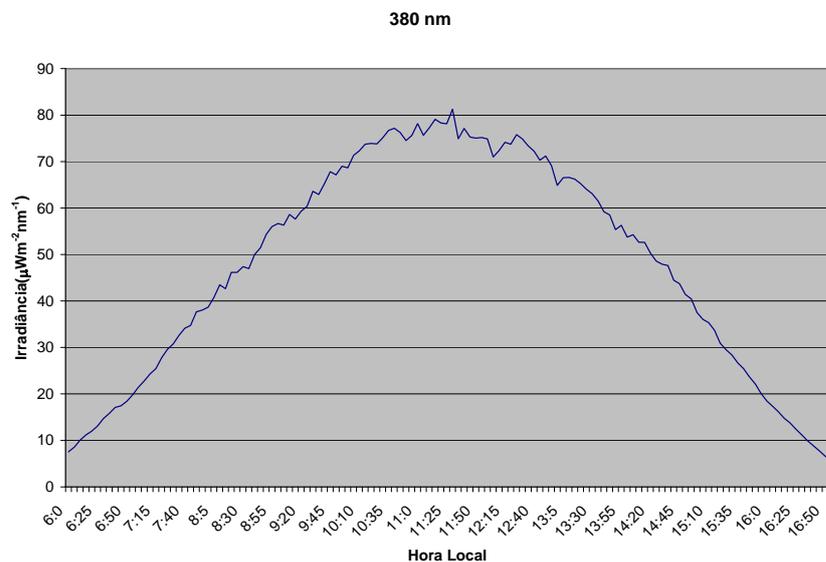
**Figura 4-11: Médias horárias da RUV em  $\lambda = 305$  nm entre 01/2001 e 12/2007.**



**Figura 4-12: Médias horárias da RUV em  $\lambda = 320$  nm entre 01/2001 e 12/2007.**



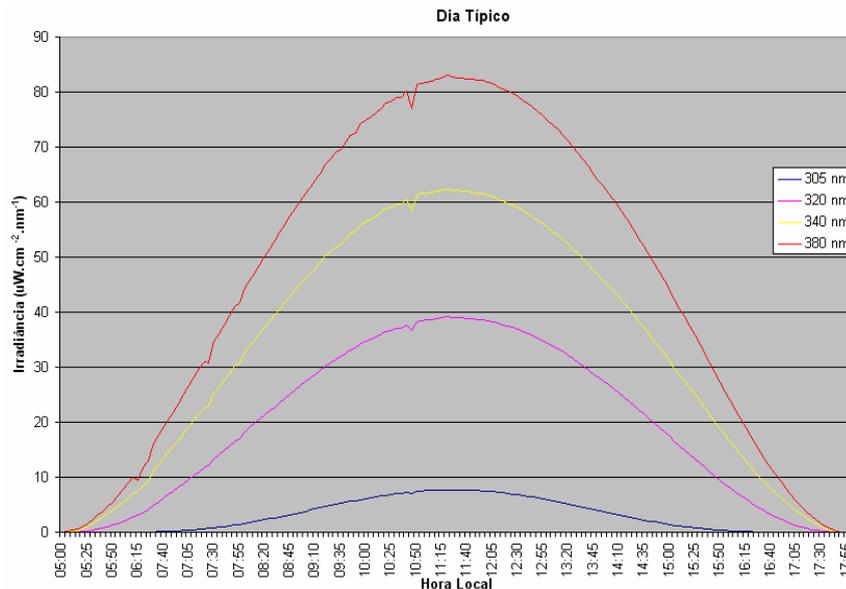
**Figura 4-13: Médias horárias da RUV em  $\lambda = 340$  nm entre 01/2001 e 12/2007.**



**Figura 4-14: Médias horárias da RUV em  $\lambda = 380$  nm entre 01/2001 e 12/2007.**

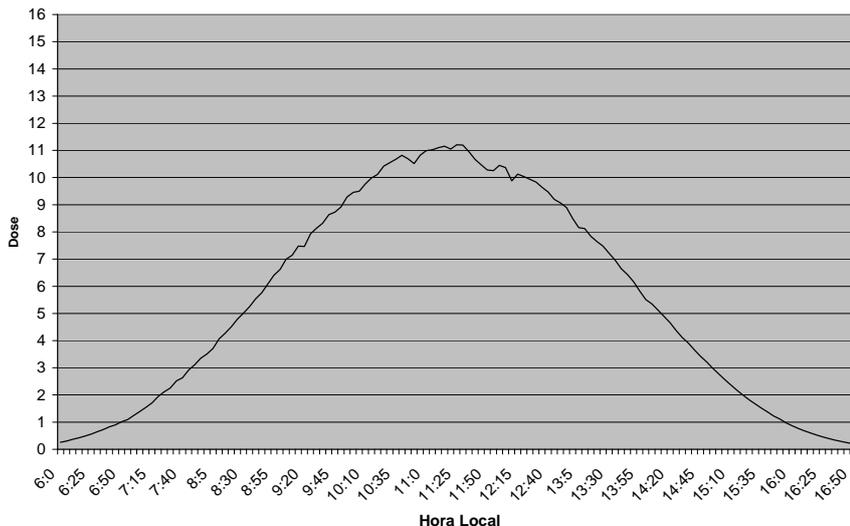
Considerando-se os resultados mostrados nas figuras 4-11 a 4-14, constatou-se que o pico de intensidade de irradiação ocorre entre 11h25min e 11h50min, independente do comprimento de onda considerado.

Apenas a título de ilustração, na figura 4-15 são apresentados simultaneamente os valores da RUV para todos os comprimentos de onda considerados, para um dia típico. Observou-se que, como esperado, a irradiância aumentou conforme o comprimento de onda da RUV aumentava. Esse fato é explicado com base na lei de Stefan-Boltzmann (ver eq. 2.2), que estabelece a distribuição espectral da radiação solar. Contudo, deve-se lembrar que os efeitos para saúde humana dependem também da capacidade de penetração da radiação. Assim, apesar da menor irradiância, a RUV para  $\lambda = 305$  nm causa maiores danos à pele do que a RUV para  $\lambda = 320$  nm e esta, por sua vez, penetra mais na pele humana do que a RUV para comprimentos de onda maiores. A irradiância de  $\lambda_{305} = 1/5\lambda_{320}$  embora o efeito biológico de  $\lambda = 305$  nm seja cerca de 10 vezes maior (ver. Eq. 3.2). Isso pode ser melhor visualizado na figura 2-3, onde se vê o espectro de Ação de Eritema, proposto por McKinlay e Diffey (1987) e adotado como um padrão pela Comissão Internacional de Iluminação.



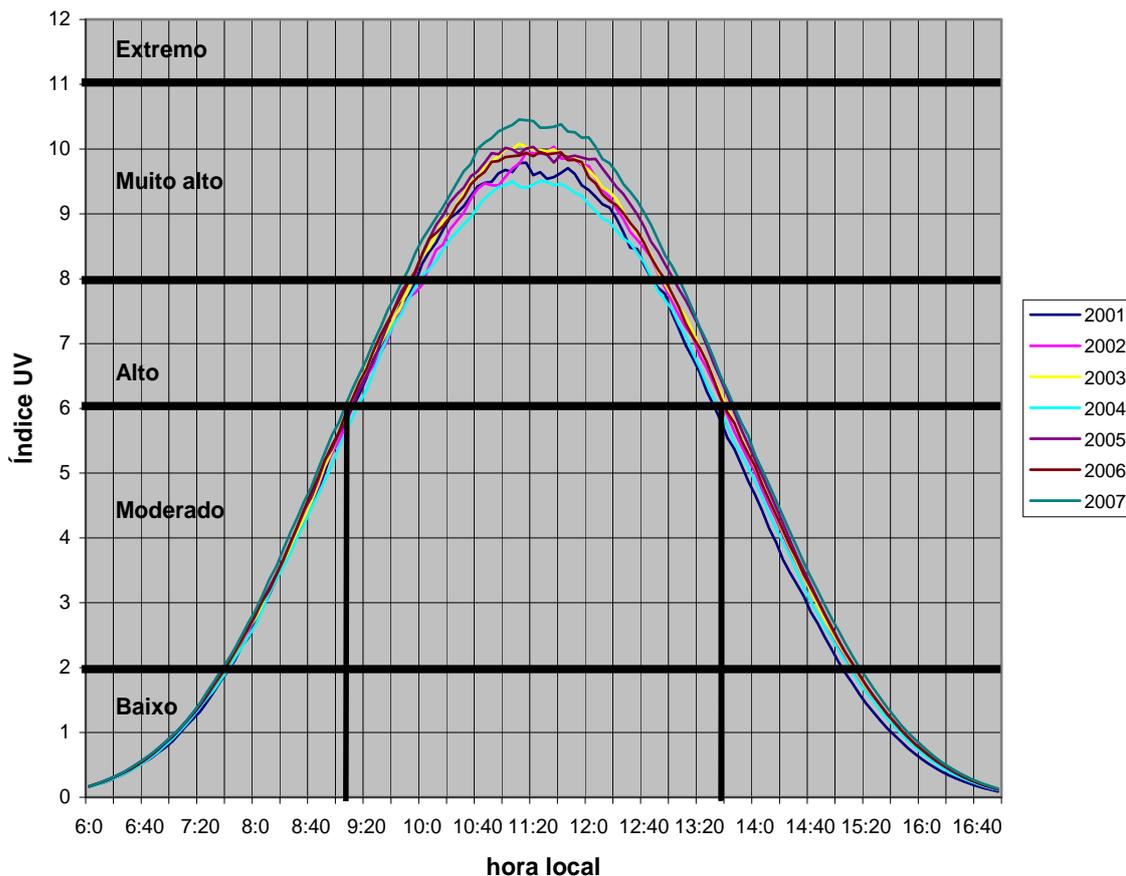
**Figura 4-15: Médias horárias da RUV para todos os comprimentos de ondas analisados na pesquisa, para um dia típico, sem nuvens.**

Na figura 4-16 vê-se a variação do IUV médio diário entre 2001 e 2007. Constatou-se um máximo entre 11h25min e 11h50min, quando o IUV atinge valores que caracterizam dose EXTREMA. Sendo essa informação importante para a pesquisa, faz-se necessária uma análise mais detalhada. Assim, serão consideradas as médias horárias anuais e mensais do IUV.



**Figura 4-16: Médias horárias da Dose entre 01/2001 e 12/2007.**

Na figura 4-17 vêem-se os índices e as categorias, conforme tabela 2-3, com média máxima anual em função da hora local de janeiro de 2001 a dezembro de 2007

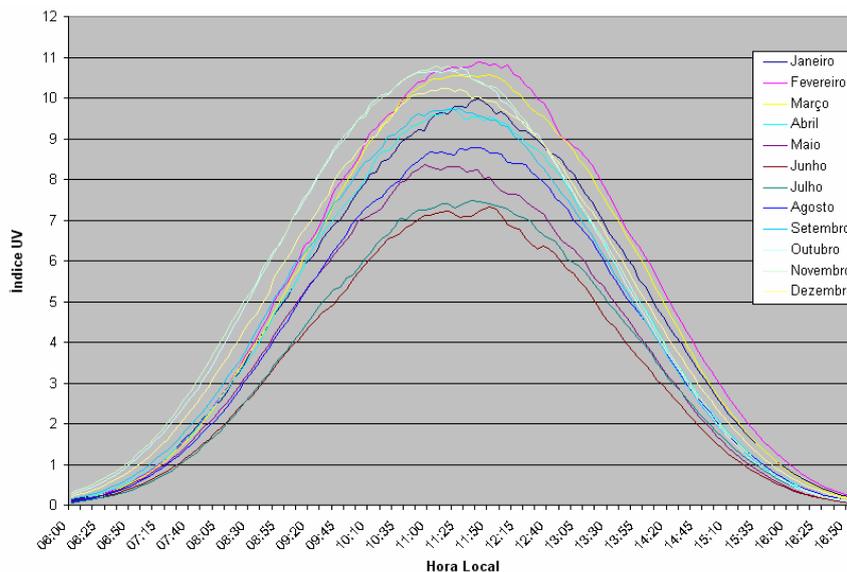


**Figura 4-17: Gráfico do índice de UV com média horárias anuais em função da hora local de janeiro de 2001 a dezembro de 2007**

Na figura 4-17 constatou-se que o índice 6 (risco ALTO) foi atingido antes das 09h20min em todos os anos. Após as 13h30min, o IUV atingiu valores inferiores a 6 em todos

os anos. Considerando-se o horário de 11h20min, ou seja, aproximadamente um horário de pico comum a todos os anos, constatou-se que o ano de 2007 apresentou maior IUV – acima de 10,4 (risco MUITO ALTO). Entre 2004 e 2007, houve um aumento de cerca de 1 nível.

Na figura 4-18 vêem-se os resultados das médias horárias mensais do IUV. Observou-se que em todos os meses os picos de IUV ocorreram antes das 12h00. Nos meses de janeiro, fevereiro, março e junho, os picos ocorreram após 11h40, e nos demais ocorreram entre 10h55 e 11h30. De outubro a fevereiro ocorreram as maiores médias (acima de 10, i.e. EXTREMO). Entre junho e julho os valores ficaram em torno de 7,3, fato que pode ser atribuído ao aumento de umidade e nebulosidade (estação das chuvas). Entre outubro e novembro o IUV atingiu nível de risco ALTO pouco antes das 09h20min. Exceto nos meses de maio, junho, julho e agosto, em todos os outros o IUV já se encontrava acima de 7 (ALTO) antes das 10h00. Exceto nos meses de fevereiro e março, em todos os outros o IUV atingiu valores inferiores a 7 após as 13h50.



**Figura 4-18: Médias horárias mensais do IUV em Natal-RN entre 01/2001 e 12/2007.**

Nas figuras 4-19 a 4-23 comparam-se as variações anuais da umidade relativa do ar, concentração de ozônio estratosférico e intensidade da RUV e/ ou Dose eritêmica. Todos os gráficos são de médias diárias obtidas entre 06h00 e 17 h00.

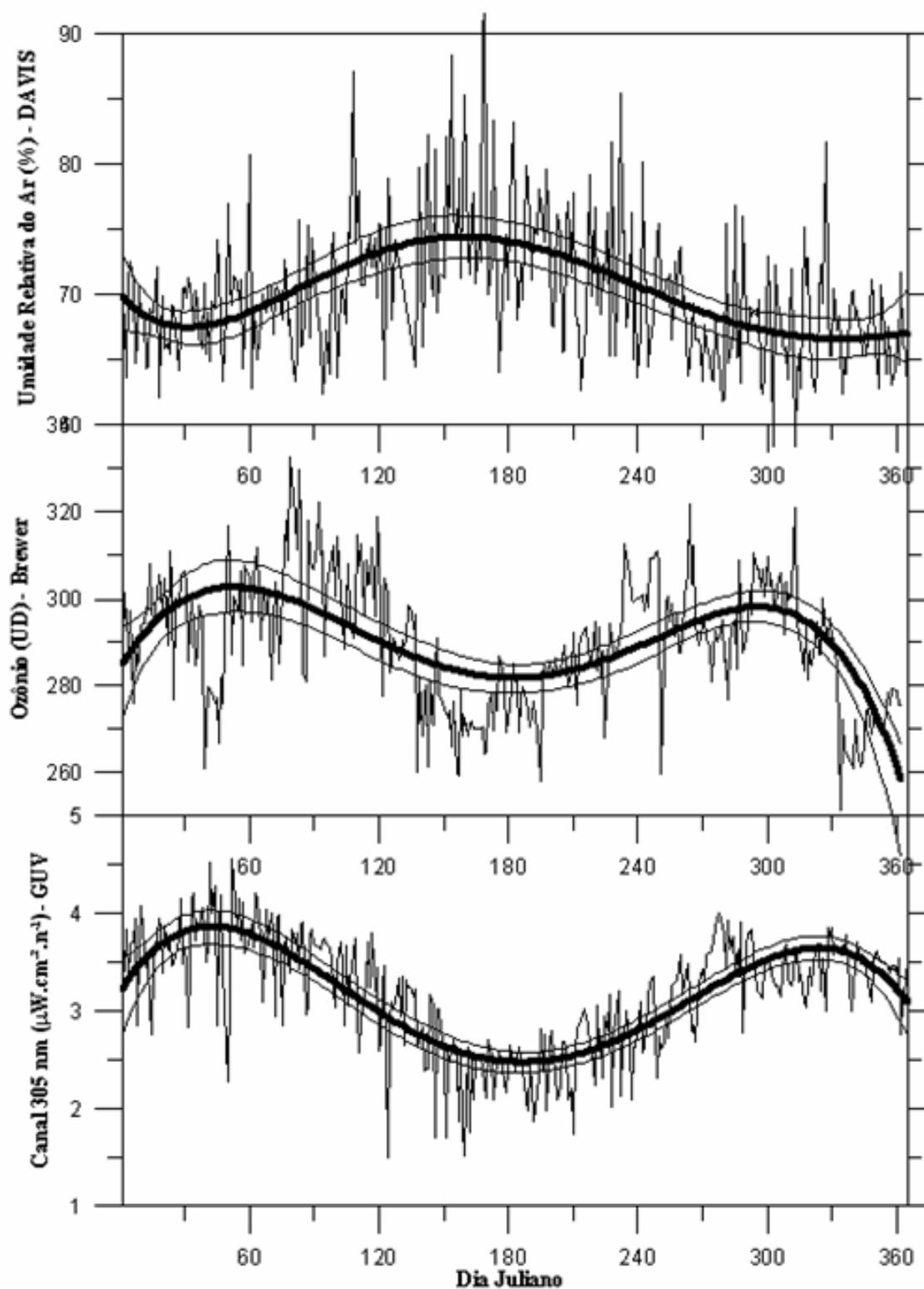


Figura 4-19: Gráfico comparativo do canal 305 nm – ozônio - umidade relativa do ar.

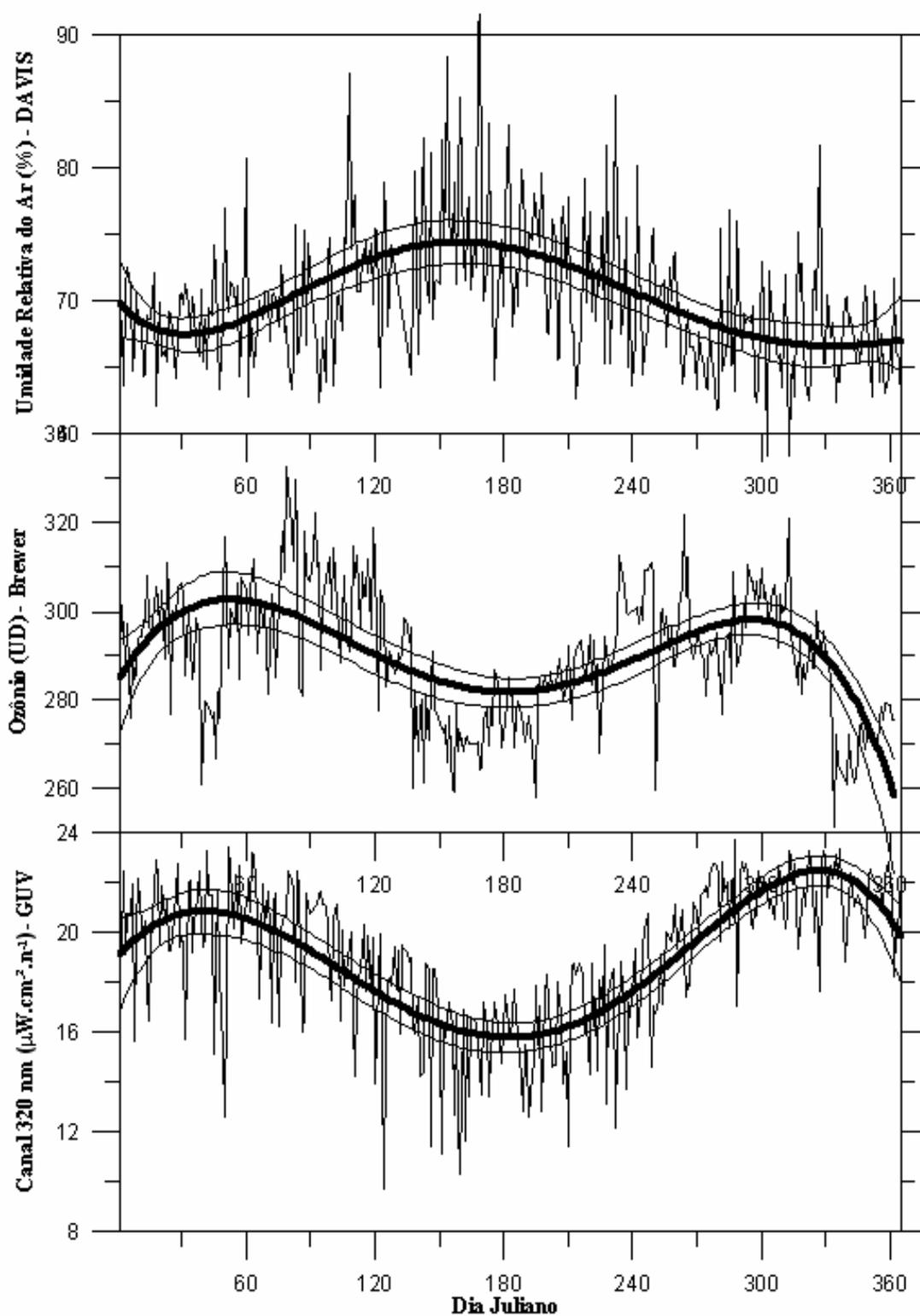


Figura 4-20: Gráfico comparativo do canal 320 nm – ozônio - umidade relativa do ar.

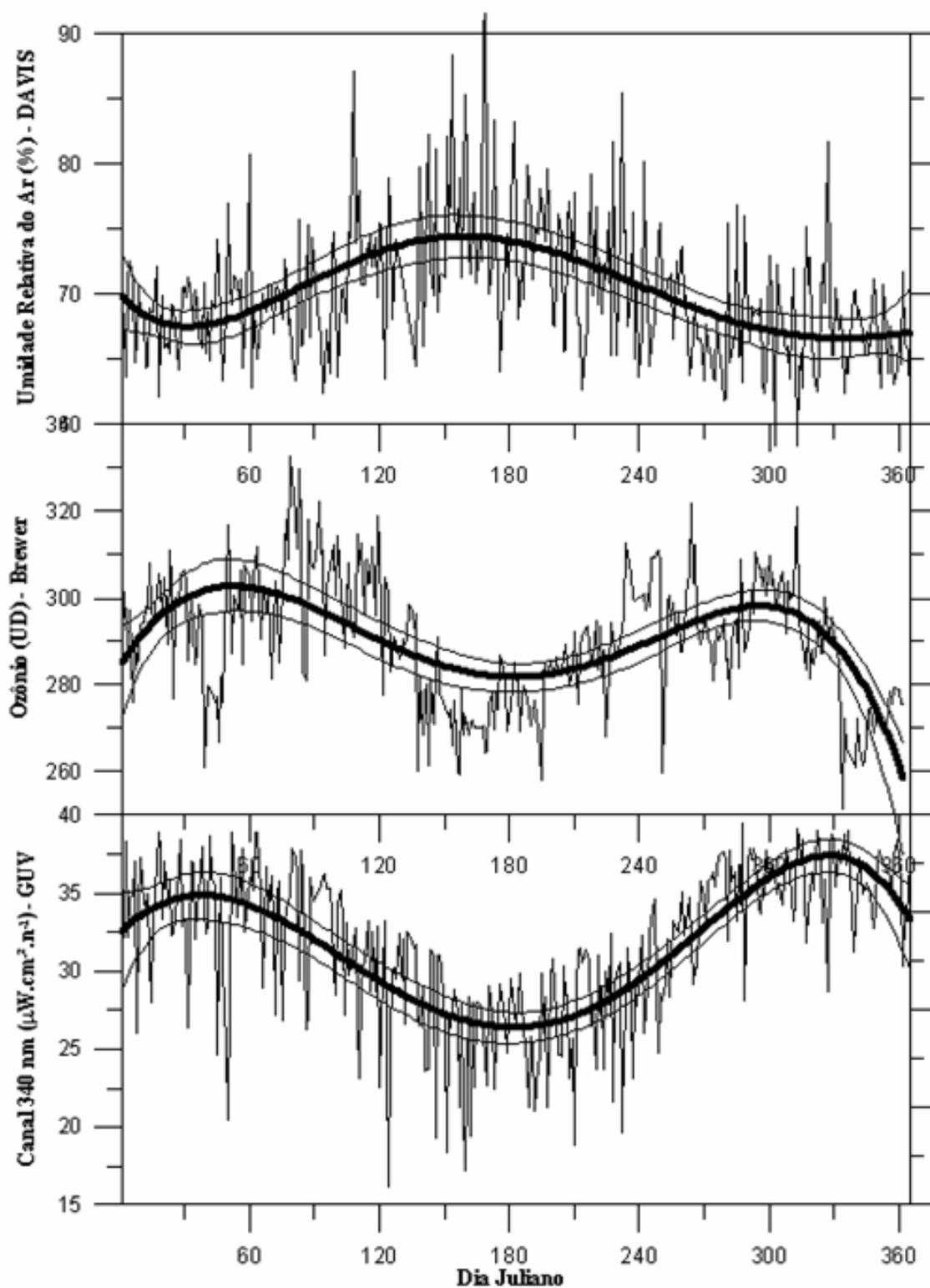


Figura 4-21: Gráfico comparativo do canal 340 nm – ozônio - umidade relativa do ar.

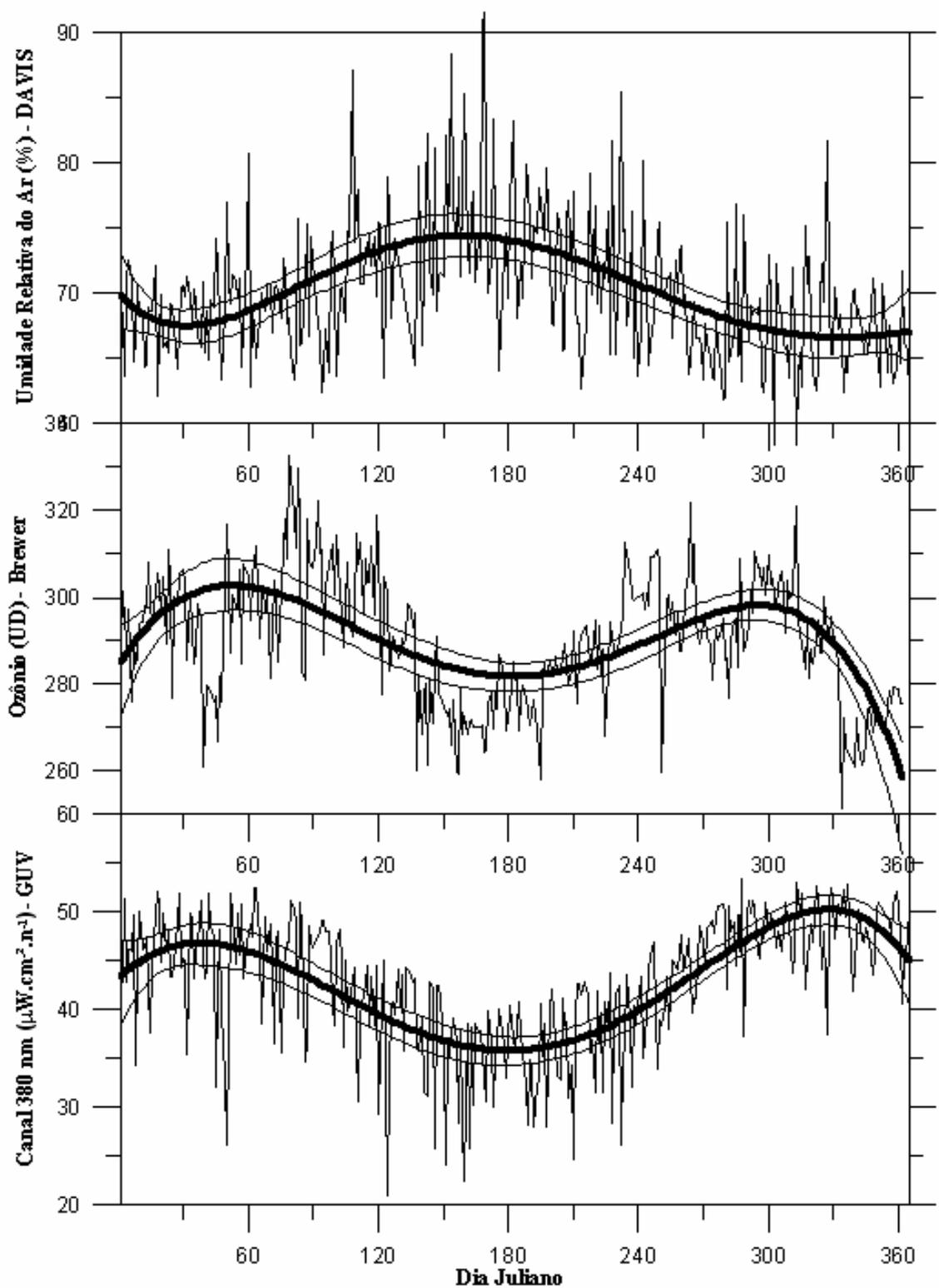


Figura 4-22: Gráfico comparativo do canal 340 nm – ozônio - umidade relativa do ar.

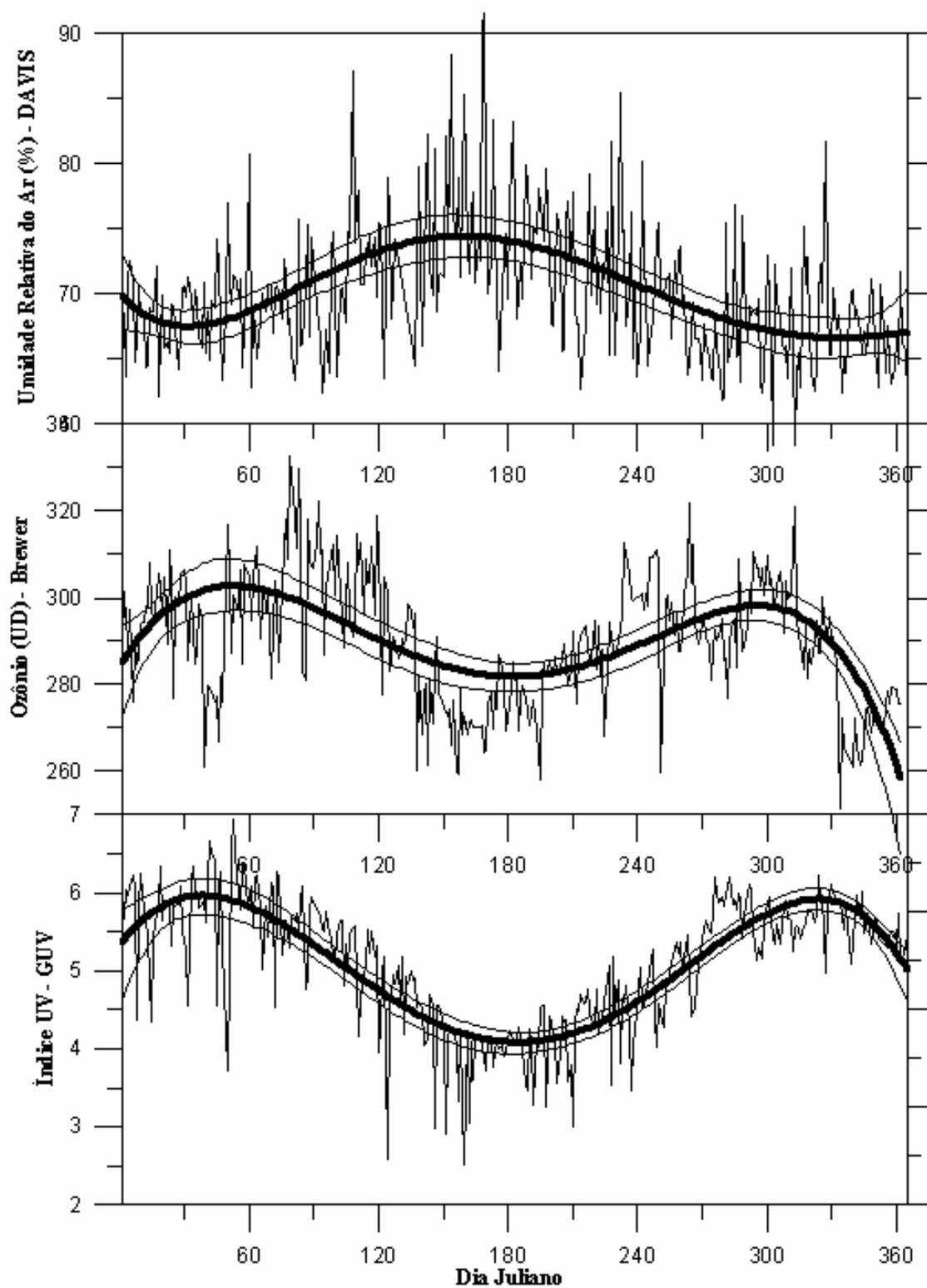


Figura 4-23: Gráfico comparativo do Índice de UV – ozônio - umidade relativa do ar.

A variação anual na intensidade da RUV se deu pela dupla passagem do Sol durante os equinócios de outono e primavera, quando o ângulo de azimute chega próximo a  $0^\circ$ .

No outono o pico é maior que na primavera pois a concentração de ozônio estratosférico é menor.

Nos meses de junho e julho ocorre o período “chuvoso” em Natal-RN, quando há redução do valor de  $O_3$ , mas a nebulosidade e a umidade relativa do ar aumentam.

Nas curvas de RUV,  $O_3$  e umidade foram aplicadas regressões polinomiais de 5ª ordem e confiabilidade de 95%.

Os dados de ozônio foram obtidos por meio de um espectrofotômetro “Brewer”.

Os dados de umidade relativa do ar foram obtidos por meio de equipamento da estação meteorológica montada no LAVAT-INPE-CRN.

## CAPÍTULO 5

### 5 Conclusões e Sugestões

#### 5.1 Conclusões

Visando investigar as hipóteses levantadas no presente estudo e após submeter os dados coletados a uma análise estatística por meio do programa de tese “ANOVA”, chegou-se a conclusão de que a hipótese nula não é válida; portanto, há diferença significativa entre as médias anuais com relação à intensidade da radiação ultravioleta nos comprimentos de onda 305 nm, 320 nm, 340 nm, 380 nm e na dose eritêmica. Observou-se que a diferença nas médias anuais das intensidades de radiação consideradas não está associada às atenuações da intensidade, mas a um aumento gradativo das mesmas. Identificou-se um aumento de 5% entre 2004 a 2007 para  $\lambda = 305$  nm; de 10% para  $\lambda = 320$  nm; e de 6% para a dose eritêmica (ver anexos). Portanto, pode-se concluir que as variações nas intensidades evoluíram de forma significativa, fato que abre espaço para estudos futuros.

Com base nas informações supracitadas, são aceitas as hipóteses alternativas  $H_1$ ,  $H_2$ ,  $H_3$ ,  $H_4$  e  $H_5$ , permitindo tirar as seguintes conclusões:

- ✓ Houve diferença significativa entre as médias anuais com relação à intensidade da RUV nos comprimentos de ondas 305, 320, 340, 380 nm e na dose eritêmica;
- ✓ De 2004 a 2007 houve um aumento de 5% para  $\lambda = 305$ , 10% para  $\lambda = 320$  e de 6% para dose eritêmica;
- ✓ A intensidade obtida para  $\lambda = 305$  nm (UV-B) representa cerca de 1/5 da obtida para  $\lambda = 320$  (UV-A) para um dia típico sem nuvens (ver Fig. 4-15);
- ✓ A RUV em Natal-RN tem como principal característica um IUV classificado em MUITO ALTO ou EXTREMO em quase todos os dias do ano, em todos os anos considerados na pesquisa;

- ✓ Os picos de RUV ocorreram antes das 12h00 em todos os dias do ano no intervalo 2001-2007;
  
- ✓ O IUV classificado ALTO foi atingido antes das 09h30min em todos os anos do intervalo 2001-2007;
  
- ✓ Sendo a diferença entre as longitudes de Natal – RN ( $35^{\circ} 12' 34''$ W) e de Brasília – GO ( $47^{\circ} 55' 47''$ W) superior a  $12^{\circ}$ , e por adotar o mesmo fuso-horário de Brasília, antes das 10h00 o IUV em Natal já se encontra no nível MUITO ALTO, razão pela qual se sugere que as ações na área de saúde considerem esse agravante quando da recomendação à população dos horários de exposição aos raios solares.

## 5.2 Sugestões

Com base nos resultados apresentados acima se sugere o seguinte:

- i) Limitar o tempo de exposição aos raios solares entre 09h10min e 13h40min;
- ii) Em atividades ao ar livre ou trabalho, usar protetor com FPS  $\geq 15$  e reaplicar a cada 02 horas; para crianças, quando expostas a RUV, por terem a pele mais sensível, usar protetor FPS  $> 20$ ;
- iii) Usar óculos de proteção solar de 100% para UV-A e UV-B indicados pelo seu oftalmologista e nunca comprados em feiras livres;
- iv) Evitar exposições a sessões de bronzeamento artificial;
- v) Envidar esforços para obter na mídia espaço para divulgação do IUV local;
- vi) Procurar um dermatologista quando identificadas manchas sobre o corpo que não desaparecem com o passar dos dias ou ferimentos que não cicatrizam;
- vii) Dar continuidade às aplicações dos resultados da pesquisa, por meio da elaboração de uma cartilha de orientação ao público sobre exposição solar;
- viii) Estudar a relação entre o comportamento da RUV e o nível de concentração de ozônio na camada atmosférica sobre Natal-RN.

## CAPÍTULO 6

### 6 Referências bibliográficas

ARAÚJO, Virgínia Maria Dantas. **Parâmetros de conforto térmico para usuários de edificações escolares no litoral nordestino brasileiro**. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) - FAUSP, São Paulo, 1996.

AUSTRALIAN INSTITUTE OF HEALTH AND WARFARE (AIHW); AUSTRALASIAN ASSOCIATION OF CANCER REGISTRIES. **Cancer in Australia 1999**. Canberra, 2002. (AIHW can,15; Câncer Series, 20).

ASHCROFT, F. **A vida no limite**. A ciência de sobrevivência. S.L.: Jorge Zahar, 2001. 315p.

BIOSPHERICAL INSTRUMENTS. **Application note: GUV “Diffey Dose” calculations**. Disponível

em:<<http://www.biospherical.com/BSI%20WWW/Products/BSI%20PDFs/GUV%20Diffey%20Dose%20Calculations.pdf>>. Acessado em 20 dez.2000.

BISQUERRA, R. **Métodos de investigación educativa**. Barcelona: CEAC, 1989.

BRASSEUR, G.; SOLOMON, S. **Aeronomy of the middle atmosphere**. Dordrecht: D. Reidel, 1986. 452p.

CORREIA, Marcelo de Paula. **Índice ultravioleta: avaliações e aplicações**. (Tese de Doutorado apresentada ao Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas) –USP, São Paulo, 2003.

DEMILLO, R. **Como funciona o clima**. São Paulo: Quark, 1998.

DIFFEY, B.L Solar ultraviolet radiation effects on biological systems. **Physics in Medicine and Biology**, v36, n.3, p.299-329, 1991.

EARTH SCIENCE CURRICULUM PROJECT (ESCP 1973). **Investigando a Terra**: versão brasileira da edição norte-americana preparada pela equipe do Earth Science Curriculum Project. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1981. v.1 e v.2.

EARTH SCIENCE CURRICULUM PROJECT (ESCP1981). **Investigando a Terra**: versão brasileira da edição norte-americana preparada pela equipe do Earth Science Curriculum Project. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1981. v.1 e v.2.

- ECHER, Ezequiel. **Observação da radiação ultravioleta solar tipo B em banda larga**. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1999. (INPE-7254-TDI/697).
- EISBERG, R.; RESNICK, R. **Física quântica: átomos, moléculas, sólidos, núcleos e partículas**. Rio de Janeiro: Campus, 1979. 928 p.
- GRASSIE, N.; Scott, G. **Polymer Degradation and Stabilization**. New York: Cambridge University, 1985.
- HARDY, R. N. **Temperatura e vida animal**. São Paulo: EPUSP, 1981. 91 p.
- KAFI, Abdullah-AL *et al.* Study on the mechanical properties of Jute/Glass Fiber-Reinforced unsaturated polyester hybrid composites: effect of surface modification by ultraviolet radiation. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v25, p.575, 2006. Disponível em: <<http://jrp.sagepub.com/cgi/content/abstract/25/6/575>>. Acesso em 20 jan. 2007.
- KIRCHHOFF, V. W. J. H. **Introdução à Geofísica Espacial**. São Paulo: EDUSP, 1991. 149p.
- KIRCHHOFF, V. W. J. H. **Ozônio e Radiação UV – B**. São José dos Campos: Transtec, 1995. 73p.
- KUDISH, A.I. *et al.* **Intercomparison of the solar UVB, UVA and global radiation clearness and UV indices for Beer Sheva and Neve Zohar (Dead Sea), Israel**. Doi:10.1016/j.energy.2004.04.033, 2005. p.1623-1641.
- LABITZKE, K.; MACCORMICK, M. P. Stratospheric Temperature Increases due to Pinatubo Aerosols. **Geophysical Research Letters**, v.19, n.2, p.207-210, 1992. Disponível em: <<http://www.agu.org/pubs/crossref/1992/91GL02940.shtml>>. Acesso em 27 de fev. 2007.
- LAMB, H. H. **Há 30 anos a terra se esfria**. Rio de Janeiro: Fundação Getúlio Vargas, 1975. p.37 – 47.
- LEME, N. P. **O Laboratório de Ozônio do INPE na Antártica: de 1986 a 2006**, proceedings do XV Simpósio Brasileiro sobre Pesquisa Antártica, outubro de 2007, São Paulo, Brasil.
- LENOBLE, J. **Atmospheric Radiative Transfer**. Hampton, VA: A DEEPAK, 1993. 532 p.
- MAGALHÃES, Marcos Nascimento; LIMA, Antônio Carlos Pedroso de. **Noções de Probabilidade e Estatística**. 6º ed. São Paulo: EDUSP, 2005.

- McKINLAY, A. F.; DIFFEY, B. L. A reference action spectrum for ultraviolet-induced erythema in human skin. In: **Passchler and Bosnjakovic ed. Human exposure to ultraviolet radiation: Risks and regulations.** Amsterdam: Elsevier, 1987.
- MEDEIROS, Eugênio Mariano Fonsêca de. **Estética do apocalipse:** (re) considerações acerca da (des) arborização urbana de Natal e seu contributo à saúde pública. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2003.
- MENDONÇA, F. **Clima e criminalidade:** ensaio analítico da correlação entre a temperatura do ar e a incidência da criminalidade urbana. Curitiba: UFPR, 2001. 182 p.
- MOAN, J.; POROJNICU, A. C.; ROBSAHM, T. E.; DAHLBACK, A.; JUZENIENE, A.; TRETTLI, S.; GRANT, W. Solar radiation, vitamin D and survival rate of colon cancer in Norway. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology* 78 (2005) 189–193.
- MONTEIRO, C. A. F. **Clima e excepcionalismo:** conjecturas sobre o desempenho da atmosfera como fenômeno geográfico. Florianópolis: UFSC, 1991. 241 p.
- MUELLER, C. G. *et al.* **Luz e visão.** Rio de Janeiro: José Olympio, 1968. 204 p.
- PALENQUE, E.R. Los efectos de la RUV solar sobre plantas y materiales de uso tecnológico. In: SACCHETTI, Francesco Zaratti; GISBERT, Ricardo Forno. **La radiación ultravioleta en Bolivia.** La Paz: OPS/OMS, 2002. p. 99-104.
- PERRY, R. H.; CHILTON, C. H. **Manual de engenharia química.** Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1980.
- PFEIFFER, J. *et al.* **A célula.** Rio de Janeiro: José Olympio, 1967. 200 p.
- PURVES, William K. *et al.* **Vida A Ciência da Biologia.** Porto Alegre: Artmed, 2002. v. 2.
- REA, L.M; PARKER, RA. **Metodologia da Pesquisa:** do planejamento à execução. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2002.
- RIBEIRO, S. K. *et al.* **Transporte e mudanças climáticas.** Rio de Janeiro: Mauá, 2000.
- ROBINSON, N. **Solar Radiation.** S.L.P.: Elsevier, 1966.
- RODRIGUES, A. **A Pesquisa Experimental.** 2 ed. Rio de Janeiro: Vozes, 1986.
- RODRIGUES, L. P. S. **Efeitos do envelhecimento ambiental acelerado em compósitos poliméricos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2007.

- ROLLANO, F. La radiación ultravioleta y la piel. In: SACCHETTI, Francesco Zaratti; GISBERT, Ricardo Forno. **La radiación ultravioleta en Bolivia**. La Paz : OPS/OMS, 2002. p.57-75.
- SILVA, A.A. **A Espessura ótica de aerossóis na Banda do UV-B**. Tese (Doutorado em geofísica espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2002. (INPE-8754-TDI/797).
- SUREDA, Vicente; GIL, Jesus A. S. **A Atmosfera e a Previsão do tempo**. Rio de Janeiro: Salvat, 1979.
- TAMAYO, H. G. La radiación ultravioleta y el ojo humano. In: SACCHETTI, Francesco Zaratti; GISBERT, Ricardo Forno. **La radiación ultravioleta en Bolívia**. La Paz: OPS/OMS, 2002. p.79-84.
- VANICEK, K. *et al.* **UV Index for the Public**. Brussels: COST-713 Action, 1999. 26p.
- VIANELLO, Rubens Leite; ALVES, Adil Rainier. **Meteorologia Básica e Aplicações**. 19 ed. Viçosa: UFV, 2000. 449p.
- VILLAFANE, V. E.; HELBLING, E. W. Radiación ultravioleta en el lago Titicaca, Bolivia: efectos y adaptaciones de los organismos planctónicos. In: SACCHETTI, Francesco Zaratti; GISBERT, Ricardo Forno. **La radiación ultravioleta en Bolívia**. La Paz: OPS/OMS, 2002. p.85-95.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). **Global Solar UV Index: A Practical guide**. Geneva: WHO, 2002. 32p. (WHO/SO2/OEH/02.2).
- ZAMORANO, F. C. B. **Observações da radiação UV-B em Punta Arenas- Chile e efeitos do buraco na camada de ozônio**. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1997. (INPE-6383-TDI/602).

## CAPÍTULO 7

### 7 Anexos

**Tabela 7-1: Amostras válidas analisadas no período de janeiro/2001 a dezembro/2007**

<b>ANO</b>	<b>305nm</b>	<b>320nm</b>	<b>340nm</b>	<b>380nm</b>	<b>Dose</b>
2001	192	192	192	192	189
2002	330	330	330	330	330
2003	333	333	333	333	333
2004	356	356	356	356	356
2005	358	358	358	358	358
2006	361	361	361	361	361
2007	359	359	359	359	359
Total	2.289	2.289	2.289	2.289	2.286

**Tabela 7-2: Médias dos máximos anuais do canal de 305 nm desde janeiro/2001 a dezembro/2007**

<b>ANO</b>	<b>Média Anual 305 nm</b>
2001	7,86
2002	7,79
2003	8,02
2004	7,55
2005	7,83
2006	7,58
2007	7,95

**Tabela 7-3: Médias dos máximos anuais do canal de 320 nm desde janeiro/2001 a dezembro/2007**

<b>ANO</b>	<b>Média Anual 320 nm</b>
2001	30,16
2002	33,00
2003	33,17
2004	33,09
2005	34,30
2006	35,65
2007	36,94

**Tabela 7-4: Médias dos máximos anuais do canal 340 nm desde janeiro/2001 a dezembro/2007**

<b>ANO</b>	<b>Média Anual 340 nm</b>
2001	63,49
2002	65,16
2003	63,87
2004	61,63
2005	59,79
2006	59,15
2007	59,10

**Tabela 7-5: Médias dos máximos anuais do canal 380 nm desde janeiro/2001 a dezembro/2007**

<b>ANO</b>	<b>Média Anual 380 nm</b>
2001	83,87
2002	86,38
2003	85,02
2004	82,17
2005	80,23
2006	79,96
2007	79,87

**Tabela 7-6: Médias dos máximos anuais do Índice UV no período de janeiro/2001 a dezembro/2007**

<b>ANO</b>	<b>Média Anual IUV</b>
2001	10,76
2002	10,93
2003	11,13
2004	10,68
2005	11,01
2006	10,90
2007	11,33

**Tabela 7-7: Média mensal do canal 305 nm no período de janeiro/2001 a dezembro/2007**

<b>Ano/mês</b>	<b>2001</b>	<b>2002</b>	<b>2003</b>	<b>2004</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>
JANEIRO		8,09	8,11	8,60	8,35	8,13	8,63
FEVEREIRO		8,19	9,30	9,06	10,07	9,41	9,71
MARÇO		8,80	9,34	8,80	9,79	9,09	9,10
ABRIL		8,31	8,40	7,92	8,94	7,91	8,36
MAIO			7,07	6,54	7,10	7,12	7,40
JUNHO	7,62	6,31	6,25	5,61	5,95	5,74	5,88
JULHO	7,98	6,09	6,34	5,22	6,02	5,60	6,45
AGOSTO	7,49	6,76	7,53	6,77	6,85	6,43	7,14
SETEMBRO	7,94	7,99		7,58	7,15	7,35	7,64
OUTUBRO	7,85	8,62	8,95	8,35	7,73	8,07	8,63
NOVEMBRO	7,81	8,44	8,89	8,27	8,14	8,33	8,47
DEZEMBRO	7,82	8,19	8,10	7,98	8,15	7,92	8,14

**Tabela 7-8: Média mensal do canal 320 nm no período de janeiro/2001 a dezembro/2007**

<b>Ano/mês</b>	<b>2001</b>	<b>2002</b>	<b>2003</b>	<b>2004</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>
JANEIRO		33,63	32,87	34,21	35,70	36,32	38,20
FEVEREIRO		34,33	35,72	35,95	39,13	40,27	40,67
MARÇO		35,23	35,74	35,85	37,57	39,40	39,63
ABRIL		33,89	32,52	32,88	36,40	34,90	37,22
MAIO	25,41		29,38	29,32	30,88	33,28	33,95
JUNHO	21,26	28,74	27,65	27,81	28,37	30,58	29,99
JULHO	22,68	27,56	29,01	26,29	29,56	30,74	32,65
AGOSTO	32,93	30,16	32,56	31,55	31,90	33,23	34,33
SETEMBRO	35,09	33,88		34,26	33,08	36,45	36,39
OUTUBRO	35,71	36,14	36,96	36,84	36,06	37,82	40,57
NOVEMBRO	34,04	36,00	37,03	36,72	36,84	38,70	40,90
DEZEMBRO	33,79	33,75	35,36	36,08	36,70	36,33	39,22

**Tabela 7-9: Média mensal do canal 340 nm no período de janeiro/2001 a dezembro/2007**

<b>Ano/mês</b>	<b>2001</b>	<b>2002</b>	<b>2003</b>	<b>2004</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>
JANEIRO		66,93	63,70	63,83	64,49	61,66	62,22
FEVEREIRO		67,97	68,71	66,95	69,08	67,33	65,37
MARÇO		68,79	69,04	67,14	65,34	65,41	63,52
ABRIL		65,95	62,86	61,47	63,48	57,60	59,48
MAIO	63,66		57,56	55,52	53,90	55,07	53,97
JUNHO	53,25	58,31	54,73	53,29	49,80	51,29	48,33
JULHO	56,98	55,72	57,27	50,14	51,75	51,46	52,33
AGOSTO	63,73	60,39	62,96	59,04	55,28	55,12	54,61
SETEMBRO	68,55	66,86		63,21	57,24	60,19	57,94
OUTUBRO	70,63	70,86	69,55	67,14	62,20	62,09	64,39
NOVEMBRO	67,93	70,02	69,54	66,89	63,14	63,48	65,11
DEZEMBRO	67,42	65,52	66,58	65,85	62,70	59,68	62,60

**Tabela 7-10: Média mensal do canal 380 nm no período de janeiro/2001 a dezembro/2007**

<b>Ano/mês</b>	<b>2001</b>	<b>2002</b>	<b>2003</b>	<b>2004</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>
JANEIRO		91,41	96,52	89,33	86,17	84,70	85,15
FEVEREIRO		93,12	91,65	89,68	90,88	90,72	87,74
MARÇO		96,13	94,77	90,34	90,08	88,46	84,80
ABRIL			91,09	86,49	84,68	83,49	83,73
MAIO	79,29		77,14	77,62	76,94	75,43	74,81
JUNHO	77,72	78,59	73,81	75,12	72,75	71,06	69,68
JULHO	75,11	73,76	75,66	74,27	70,58	70,51	73,49
AGOSTO	84,14	81,26	84,34	70,15	75,83	74,51	74,45
SETEMBRO	90,07	88,22		84,26	76,76	81,93	78,38
OUTUBRO	92,96	93,79	93,04	85,24	84,99	83,97	86,26
NOVEMBRO	90,39	93,54	91,83	90,33	86,25	85,92	87,31
DEZEMBRO	89,30	87,69	88,96	88,53	83,70	82,94	84,78

**Tabela 7-11: Média mensal da Dose eritêmica no período de janeiro/2001 a dezembro/2007**

<b>ANO</b>	<b>2001</b>	<b>2002</b>	<b>2003</b>	<b>2004</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>
JANEIRO		11,69	11,06	12,10	11,61	11,45	11,97
FEVEREIRO		11,33	12,49	12,35	13,67	13,16	13,46
MARÇO		12,10	12,87	12,30	13,00	12,49	12,47
ABRIL		11,61	11,53	10,98	12,42	10,96	11,72
MAIO			9,72	9,28	10,06	10,21	10,59
JUNHO	9,82	9,16	9,04	8,36	8,84	8,70	8,85
JULHO	10,37	8,73	9,17	7,71	8,74	8,65	9,76
AGOSTO	10,50	9,78	10,74	9,86	10,00	9,68	10,52
SETEMBRO	11,19	10,89		10,61	10,11	10,77	10,69
OUTUBRO	11,20	12,02	12,32	11,84	10,91	11,55	12,38
NOVEMBRO		11,83	12,16	11,77	11,69	11,99	12,29
DEZEMBRO	11,08	11,21	11,35	11,16	11,41	11,36	11,48

Tabela 7-12: Distribuição de Fisher –Snedecor

$\sqrt{2/v_1}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	20	40	60	120	infinito
1	161,40	199,50	215,70	224,60	230,20	234,00	236,80	238,90	240,50	241,90	248,00	251,10	252,20	253,30	254,30
2	18,510	19,000	19,160	19,250	19,300	19,330	19,350	19,370	19,380	19,400	19,450	19,470	19,480	19,490	19,500
3	10,130	9,552	9,277	9,117	9,014	8,941	8,887	8,845	8,812	8,786	8,660	8,594	8,572	8,549	8,526
4	7,709	6,944	6,591	6,388	6,256	6,163	6,094	6,041	5,999	5,964	5,803	5,717	5,688	5,658	5,628
5	6,608	5,786	5,410	5,192	5,050	4,950	4,876	4,818	4,773	4,735	4,558	4,464	4,431	4,399	4,365
6	5,987	5,143	4,757	4,534	4,387	4,284	4,207	4,147	4,099	4,060	3,874	3,774	3,740	3,705	3,669
7	5,591	4,737	4,347	4,120	3,972	3,866	3,787	3,726	3,677	3,637	3,445	3,340	3,304	3,267	3,230
8	5,318	4,459	4,066	3,838	3,688	3,581	3,501	3,438	3,388	3,347	3,150	3,043	3,005	2,967	2,928
9	5,117	4,257	3,863	3,633	3,482	3,374	3,293	3,230	3,179	3,137	2,937	2,826	2,787	2,748	2,707
10	4,965	4,103	3,708	3,478	3,326	3,217	3,136	3,072	3,020	2,978	2,774	2,661	2,621	2,580	2,538
11	4,844	3,982	3,587	3,357	3,204	3,095	3,012	2,948	2,896	2,854	2,646	2,531	2,490	2,448	2,405
12	4,747	3,885	3,490	3,259	3,106	2,996	2,913	2,849	2,796	2,753	2,544	2,426	2,384	2,341	2,296
13	4,667	3,806	3,411	3,179	3,025	2,915	2,832	2,767	2,714	2,671	2,459	2,339	2,297	2,252	2,206
14	4,600	3,739	3,344	3,112	2,958	2,848	2,764	2,699	2,646	2,602	2,388	2,266	2,223	2,178	2,131
15	4,543	3,682	3,287	3,056	2,901	2,791	2,707	2,641	2,588	2,544	2,328	2,204	2,160	2,114	2,066
16	4,494	3,634	3,239	3,007	2,852	2,741	2,657	2,591	2,538	2,494	2,276	2,151	2,106	2,059	2,010
17	4,451	3,592	3,197	2,965	2,810	2,699	2,614	2,548	2,494	2,450	2,230	2,104	2,058	2,011	1,960
18	4,414	3,555	3,160	2,928	2,773	2,661	2,577	2,510	2,456	2,412	2,191	2,063	2,017	1,968	1,917
19	4,381	3,522	3,127	2,895	2,740	2,628	2,544	2,477	2,423	2,378	2,156	2,026	1,980	1,930	1,878
20	4,351	3,493	3,098	2,866	2,711	2,599	2,514	2,447	2,393	2,348	2,124	1,994	1,946	1,896	1,843
30	4,171	3,316	2,922	2,690	2,534	2,421	2,334	2,266	2,211	2,165	1,932	1,792	1,740	1,684	1,622
40	4,085	3,232	2,839	2,606	2,450	2,336	2,249	2,180	2,124	2,077	1,839	1,693	1,637	1,577	1,509
60	4,001	3,150	2,758	2,525	2,368	2,254	2,167	2,097	2,040	1,993	1,748	1,594	1,534	1,467	1,389
120	3,920	3,072	2,680	2,447	2,290	2,175	2,087	2,016	1,959	1,911	1,659	1,495	1,429	1,352	1,254
infinito	3,842	2,996	2,605	2,372	2,214	2,099	2,010	1,938	1,880	1,831	1,571	1,394	1,318	1,221	1,000