

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**PROGRAMA DE MESTRADO**  
**EM MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS**

**Projeções de fluxos de R-UV para a América do Sul com base nas  
estimativas do conteúdo de ozônio para o século XXI**

**Gabriela Ramos Moraes**

**Itajubá, dezembro de 2015**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
PROGRAMA DE MESTRADO  
EM MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS**

**Gabriela Ramos Moraes**

**Projeções de fluxos de R-UV para a América do Sul com base nas  
estimativas de conteúdo de ozônio para o século XXI**

**Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em  
Meio Ambiente e Recursos Hídricos da  
Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, como  
parte das exigências para a obtenção do título de  
Mestre em Meio Ambiente e Recursos Hídricos.**

**Área de Concentração: Mudanças Climáticas**

**Orientador: Prof. Dr. Marcelo de Paula Corrêa**

**Dezembro de 2015**

**Itajubá**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
PROGRAMA DE MESTRADO  
EM MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS**

**Gabriela Ramos Moraes**

**Projeções de fluxos de R-UV para a América do Sul com base nas  
estimativas de conteúdo de ozônio para o século XXI**

Dissertação aprovada por banca examinadora em 15  
de dezembro de 2015, conferindo à autora o título de  
**Mestre em meio Ambiente e Recursos Hídricos.**

**Banca Examinadora:**

Prof. Dr. Marcelo de Paula Corrêa (orientador)

Prof. Dr. Roger Rodrigues Torres

Prof. Dr. Dr. Cristiano Prestrelo de Oliveira

**Dezembro de 2015**

**Itajubá – Minas Gerais**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Mauá  
Bibliotecária - CRB

## **Agradecimentos**

Agradeço ao meu orientador Prof. Marcelo de Paula Corrêa, pelo apoio e excelente condução, além da indiscutível compreensão em momentos difíceis. Agradeço ao corpo docente e ao programa de Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela oportunidade de participar deste grupo de estudos.

Agradeço ao apoio incondicional e eterno da minha mãe, do meu pai de coração e das minhas queridas irmãs. Um enorme agradecimento ao meu companheiro Gustavo por todo amor, paciência, apoio, motivação, ajuda e perseverança. Agradeço de forma especial ao apoio e torcida da minha sogra, sogro e cunhado.

Agradeço a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior- CAPES pelo apoio financeiro.

## Resumo

As mudanças no clima podem resultar em alterações em diversos parâmetros atmosféricos. A quantidade de RUV que chega à superfície do planeta depende de diversos fatores, tais como a posição do sol, a altitude e a composição da atmosfera. No caso dos componentes atmosféricos, o conteúdo total de ozônio (CTO) tem destaque relevante uma vez que é o principal absorvedor de RUV. A radiação ultravioleta (R-UV) é essencial para saúde humana, pois é fundamental para a síntese de vitamina D no organismo. Por outro lado, a exposição excessiva à R-UV pode ser maléfica à saúde. Esta prática está associada a casos de câncer de pele, catarata, queimadura, envelhecimento precoce, entre outros males. Por essa razão, esse estudo avaliou o comportamento do CTO na América do Sul ao longo do século XXI, em função dos diferentes cenários climáticos para o futuro, com vistas a avaliar o impacto sobre a dose de RUV em superfície para cada um destes cenários. Para tanto, o CTO sobre a América do Sul foi avaliado ao longo do século XXI utilizando quatro modelos climáticos (GFDL-CM3, MIROC5, IPSL-CM5A-LR e CSIRO-MK3.6) a fim de projetar as doses de RUV em superfície nos quatro cenários climáticos (RCP 2.6, 4.5, 6.0 e 8.5). O modelo *Tropospheric Ultraviolet-Visible* (TUV) foi utilizado para calcular as projeções de RUV em superfície e o impacto sobre a saúde humana calculando-se as doses eritêmicas (E-UV) e para síntese de vitamina D (D-UV). Os resultados indicam diminuição nas doses de R-UV em todas as localidades estudadas. Todos os cenários e modelos apresentam tendência de aumento de CTO nas regiões de altas latitudes ao longo do século, e os maiores valores de CTO são observados para RCP 8.5 nas regiões de médias e altas. As diferenças entre os RCP 2.6, 4.5 e 6.0 não foram significativas em muitas das localidades estudada. O aumento do CTO nas regiões de baixas e médias latitudes resultará em diminuição no IUV e nas doses de E-UV ao longo do século. Contudo, não provocará mudanças nos impactos sobre a saúde da população, pois não será suficiente para diminuir o risco de exposição à R-UV. Nas regiões de baixas e médias latitudes (10.5° e -34.6°) não foram observadas variações nos tempos de exposição de E-UV e D-UV. Em todas as estações do ano, nas regiões de baixas e médias latitudes o tempo de exposição à R-UV para síntese de 1000 IU de vitamina D foi inferior a 10 minutos para os fototipos I, II, III, IV e V. O aumento do CTO ao longo do século na América do Sul não indica possibilidade de redução efetiva dos níveis de R-UV e, portanto, não são suficientes para exercer um efeito protetor à saúde humana, independente dos cenários climáticos.

Palavras-Chave: radiação ultravioleta, mudanças climáticas, saúde humana.

## Abstract

Climate change may result in changes in various atmospheric parameters. The amount of ultraviolet radiation that reaches the surface of the planet depends on several factors such as the sun's position, altitude and the composition of the atmosphere. In the case of atmospheric components, the total content of ozone (TOC) material have highlighted since it is the primary absorber of UVR. Ultraviolet radiation (UVR) is essential for human health, because it is essential for the synthesis of vitamin D in the body. On the other hand, excessive exposure to UVR can be malefic for health. This behavior is associated with cases of skin cancer, cataracts, sunburn, premature aging and others diseases. Therefore, this study evaluated the TOC in South America over the twenty-first century, according to different climate scenarios for the future, in order to assess the impact on the dose of UVR surface for each of these scenarios. Thus, the TOC of South America was valued over twenty-first century using four climate models (GFDL-CM3, MIROC5, IPSL-CM5A-LR and CSIRO-MK3.6) in order to design the doses of UVR surface the four climate scenarios (RCP 2.6, 4.5, 6.0 and 8.5). The model Tropospheric Ultraviolet-Visible (TUV) was used to calculate the projections of UVR surface and the impact on human health by calculating the erythemal doses (E-UV) and synthesis of vitamin D (D-UV). The results indicate a decrease in UVR doses above all studied locations. Over the century, all scenarios and models presented trend of increasing TOC at high latitude regions, and the greatest TOC values are observed for RCP 8.5. The differences between the RCP 2.6, 4.5 and 6.0 were not significant in many of the locations studied. Increases in TOC in the regions of low and mid-latitudes may result in decrease in the UVI and the E-UV doses throughout the century. However, the diminish will not impacts on behalf of people's health, it will not be enough to reduce the risk of exposure to UVR. In the low and mid-latitudes (10.5 ° and -34.6 °) were observed variations in exposure times of E-UV and UV-D. In all seasons of the year, the regions of low and mid-latitudes time of exposure to UV-A for the synthesis of 1000 IU vitamin D was lower than 10 minutes for skin types I, II, III, IV and V. Increasing TOC throughout the century in South America does not indicate the possibility of effective reduction of UVR levels and therefore are not sufficient to exert a protective effect on human health, regardless of the climate scenarios.

Keywords: Ultraviolet Radiation, Climate Change, Human Health.





## Lista de Figuras

Figura 1 - Representação das primeiras faixas do espectro eletromagnético.	12
Figura 2 - Comprimentos de onda de R-UV e profundidade de penetração na pele.	19
Figura 3 - Efeitos agudos e crônicos da R-UV sob a pele.	20
Figura 4 - Classificação do IUV e proteções recomendadas.	25
Figura 5 - Forçante radiativa total para os cenários climáticos (RCP).	26
Figura 6 - Mapa da América do Sul destacando as cidades escolhidas para o estudo.	29
Figura 7 - Médias anuais de CTO em Caracas, Ushuaia e Base Comandante Ferraz - série histórica de 1978 a 2013.	35
Figura 8 - Gráfico <i>boxplot</i> representando os dados de CTO de todas as localidades estudadas para cada modelo climático.	36
Figura 9 - Dendograma de ligação entre os quatro modelos utilizados.	37
Figura 10 - Gráficos de box plot dos dados de CTO (DU) dos quatro modelos climáticos (linhas) em todas as estações (colunas) para todas as localidades estudadas.	37
Figura 11 - Projeções do CTO para todas as localidades na estação da primavera - RCP 26 e RCP85.	41
Figura 12 - Projeções de IUV para todas as localidades no período de verão – RCP26 e RCP85.	49
Figura 13 - Projeções de IUV para todas as localidades no período de primavera até o final do século – RCP26 e RCP85.	50
Figura 14 - Dose eritematosa acumulada ao longo do dia para cada localidade no período de verão.	54
Figura 15 - Dose de radiação acumulada para síntese de vitamina D ao longo do dia para cada localidade no período de verão.	59

## Lista de Tabelas

Tabela 1 - Classificação do tipo de pele humana de acordo com os efeitos agudos e crônicos relativos à exposição solar.	22
Tabela 2 - Tipos de pele e quantidade de radiação UVB e UVA necessária para produzir eritema.	23
Tabela 3 – Principais características de cada cenário climático (RCP).	27
Tabela 4 - Caracterização das áreas de estudo: coordenadas geográficas, número de habitantes e número de casos de câncer de pele (melanoma e não melanoma).	29
Tabela 5 - Descrição sumária dos modelos climáticos utilizados no estudo.	33
Tabela 6 – Coeficiente de similaridade entre os quatro modelos climático.	37
Tabela 7 – Diferença relativa das médias do CTO referente a cada estação do ano entre os dados atuais e o período T1.	43
Tabela 8 – Diferença relativa das médias do CTO referente a cada estação do ano entre os dados atuais e o período T2.	45
Tabela 9 – IUV no período de inverno calculado para todas as localidades.	48
Tabela 10 - IUV no período de primavera calculado para todas as localidades.	49
Tabela 11 - IUV no período de verão calculado para todas as localidades.	51
Tabela 12 – Médias das diferenças doses eritematosas entre os dados atuais e o período T1 (2050) para os dois cenários climáticos extremos (RCP 2.6 E RCP 8.5).	53
Tabela 13 – Média das diferenças das doses eritematosas entre os dados atuais e o período T2 (2100) para os dois cenários climáticos extremos (RCP 2.6 e RCP 8.5).	55
Tabela 14 - Tempo de exposição (minutos) projetados para 2050 e 2100 próximo ao meio dia local para causar eritema em indivíduos de fototipo II e V.	56
Tabela 15 – Média da diferença relativa (%) das doses diárias acumuladas para síntese de vitamina D.	58
Tabela 16 – Médias da diferença relativa (%) das doses diárias acumuladas para síntese de vitamina D.	60
Tabela 17 - Tempo de exposição (minutos) próximo ao meio dia local para síntese de 1000 IU de vitamina D em indivíduos de fototipo II e V com exposição de corpo inteiro.	61

## SUMÁRIO

<b>1. Introdução</b>	<b>9</b>
1.1. Objetivos	11
<b>2. Referencial Teórico</b>	<b>12</b>
2.1. Radiação Ultravioleta	12
2.1.1 O Espectro eletromagnético	12
2.1.2. Interação com a atmosfera e a superfície	13
2.1.3. R-UV e saúde	16
2.1.4. O Índice Ultravioleta	24
2.2. Projeções da R-UV em função das mudanças climáticas.	25
2.2.1. O IPCC	25
2.2.2. CMIP5	27
<b>3. Metodologia</b>	<b>28</b>
3.1. Área de Estudo	28
3.2. Modelos Climáticos	32
3.3. Modelo para cálculo de R-UV	33
3.4. Séries temporais de ozônio	34
<b>4. Resultados</b>	<b>34</b>
4.1. Modelos e Cenários (RCP)	<b>36</b>
4.2. Evolução temporal do Conteúdo Total de Ozônio	39
4.3. Mudanças no IUV devido às mudanças do ozônio	46
4.4. Dose Eritematosa Mínima	52
4.5. Dose Para Síntese de Vitamina D	57
<b>5. Conclusão</b>	<b>62</b>
<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>65</b>

# 1. Introdução

Um grande número de pesquisas vem sendo desenvolvidas para compreender os resultados das atividades humanas sobre o clima futuro e seus possíveis impactos (ELIAS, 2009). Entender e prever os efeitos das mudanças climáticas é essencial para planejar medidas a fim de mitigar os possíveis impactos sobre a saúde e os ecossistemas. O estudo das mudanças climáticas é muito abrangente, pois envolve a análise de um número relevante de diferentes parâmetros, não-linearidades e complexidades, com impactos diretos e indiretos de caráter multi e interdisciplinar. Neste caso particular, o presente estudo tem foco nos efeitos das variações do conteúdo de ozônio sobre os fluxos de radiação solar ultravioleta (R-UV) e os potenciais impactos sobre a saúde humana.

Por exemplo, ecossistemas terrestres e aquáticos podem ser modificados de acordo com as alterações nos fluxos de R-UV. As mudanças climáticas podem alterar as quantidades da R-UV que atingem a superfície promovendo riscos diretos à saúde humana, como aumento de doenças causadas pelo excesso ou falta de exposição à R-UV. A R-UV atua em diferentes processos biológicos, o que justifica diversos efeitos na saúde humana. A baixa exposição à radiação solar implica em déficit na síntese de vitamina D e doenças ósseas. A exposição a altos índices de R-UV aumenta o risco de algumas doenças como câncer de pele, imunossupressão e catarata (MACKENZIE *et al.*, 2010). Um efeito indireto dessas alterações nos ecossistemas está relacionado ao comprometimento da disponibilidade ou qualidade dos alimentos resultando, novamente, em risco à saúde humana (AUCAMP, BJÖRN e LUCAS, 2011).

A quantidade de R-UV depende principalmente da concentração de ozônio na estratosfera, isto é, na parte mais alta da atmosfera pois este elemento é o principal absorvedor da R-UV. Segundo McMichael *et al.* (2003), o efeito do esgotamento da camada de ozônio provocada pela emissão de compostos clorados de flúor e bromo não está diretamente relacionada às mudanças climáticas. Entretanto, pesquisas recentes – WAUGH *et al.*, 2009; NORVAL *et al.*, 2011; MCKENZIE *et al.*, 2011; VAROTSOS *et al.*, 2013 - apontam que as concentrações de ozônio estratosférico, são influenciadas por alguns gases de efeito estufa (GEE). Além disso, os mesmos estudos discutem o aumento da concentração de ozônio na troposfera devido às emissões dos GEEs.

Hartman *et al.* (2000) sugeriram que mudanças na temperatura global e o esgotamento da camada de ozônio podem estar relacionados ao aumento no gradiente de temperatura entre a superfície e a estratosfera. O aumento da temperatura na troposfera, causado pelo aumento da emissão de GEE, influencia a dinâmica da temperatura de toda a atmosfera podendo provocar diminuição da temperatura na estratosfera. Este fenômeno afeta a dinâmica das reações de formação e destruição do ozônio estratosférico. As possíveis mudanças na espessura da camada de ozônio tendem a alterar a incidência de R-UV na superfície. Onde houver maior quantidade de ozônio esperam-se menores índices de R-UV.

Em 2000, os pesquisadores Gruijl e Leun, apontaram que os casos de câncer de pele tenderiam a diminuir em meados do século XXI concomitante à regeneração da camada de ozônio prevista para o mesmo período. Estas estimativas são baseadas no sucesso de programas de erradicação de substâncias altamente reagentes, como o CFC, propostos em acordos internacionais. A campanha de proteção à camada de ozônio iniciou-se com o acordo de Montreal, seguido por subsequentes atualizações (KAYSER e VEEN, 2007).

No entanto, apesar do consenso sobre a recuperação da camada de ozônio, os estudos recentes mostram que o impacto pode não ser tão evidente nas regiões de latitudes mais baixas (BAIS *et al.*, 2011). Sabe-se pouco sobre o futuro do ozônio sobre o continente sul-americano. Pouco é conhecido o impacto das mudanças climáticas sobre o conteúdo total de ozônio (CTO) e seu impacto sobre as doses de R-UV em superfície. Conhecer as possíveis mudanças na quantidade de R-UV em superfície na América do Sul é um importante instrumento para elaboração de medidas para proteger a saúde da população, por exemplo, advertir sobre os riscos da exposição ao sol e o aumento do risco de desenvolver câncer de pele.

Estima-se que se as medidas propostas pelo Protocolo de Montreal não tivessem sido aplicadas o número de casos de câncer de pele seria 16% maior em 2030 (DIJK *et al.*, 2013). Contudo, ainda são esperados altos índices de casos de câncer nas próximas duas décadas. Políticas públicas destinadas ao tratamento de doenças causadas pela exposição ao sol podem ser amparadas por pesquisas que estimem a R-UV em superfície. Isto é especialmente relevante para grande parte do continente da América do Sul, pois este recebe grande quantidade de R-UV em superfície em longos períodos do ano. Isto implica em um maior risco à saúde da população ali localizada. No Brasil houve um dramático aumento nos casos de câncer de pele induzidos por R-UV. Foram estimados mais de 189 mil novos casos em 2014 e 2015 (INCA, 2014).

As alterações na quantidade de R-UV em superfície devem ser avaliadas com relação a sua relevância aos efeitos sobre a saúde humana. Estudos recentes estimaram uma pequena redução nas doses de R-UV sobre a Europa ao longo do século XXI (CORRÊA *et al.*, 2013). Contudo esta redução não será suficiente para evitar os danos causados pela exposição ao sol. A atenuação apresentou resultados distintos para diferentes cenários climáticos futuros. Nesse estudo, observou-se a tendência de atenuação da R-UV em superfície em regiões de altas latitudes durante a primavera para cenários climáticos futuros de maior poluição, enquanto em cenários de menor poluição observou-se menor atenuação da R-UV.

## 1.1. Objetivos

O principal objetivo deste estudo é estimar as doses de R-UV em superfície para diferentes cenários climáticos na América do Sul.

Os objetivos específicos são:

- a. Analisar os impactos das variações das doses de R-UV sobre a saúde humana;
- b. Comparar as projeções de R-UV em superfície entre diferentes regiões;
- c. Avaliar possíveis impactos sobre as irradiâncias para síntese de vitamina D.
- d. Fornecer subsídios às políticas públicas de combate ao câncer de pele Brasil e na América do Sul ao longo do século XXI.

## 2. Referencial Teórico

### 2.1. Radiação Ultravioleta

#### 2.1.1 O Espectro eletromagnético

A principal fonte natural de energia para o planeta Terra é o Sol. A energia emitida pelo Sol compreende, praticamente, todos os comprimentos de onda do espectro eletromagnético, das ondas de rádio aos raios gama (Figura 1). No entanto, cerca de 99% dessa energia corresponde às radiações ultravioleta, visível e infravermelha. Além disso, boa parte da energia solar não atinge a superfície do planeta devido às interações físicas (absorção, reflexão e dispersão) com componentes da atmosfera (KOLLER, 1952).

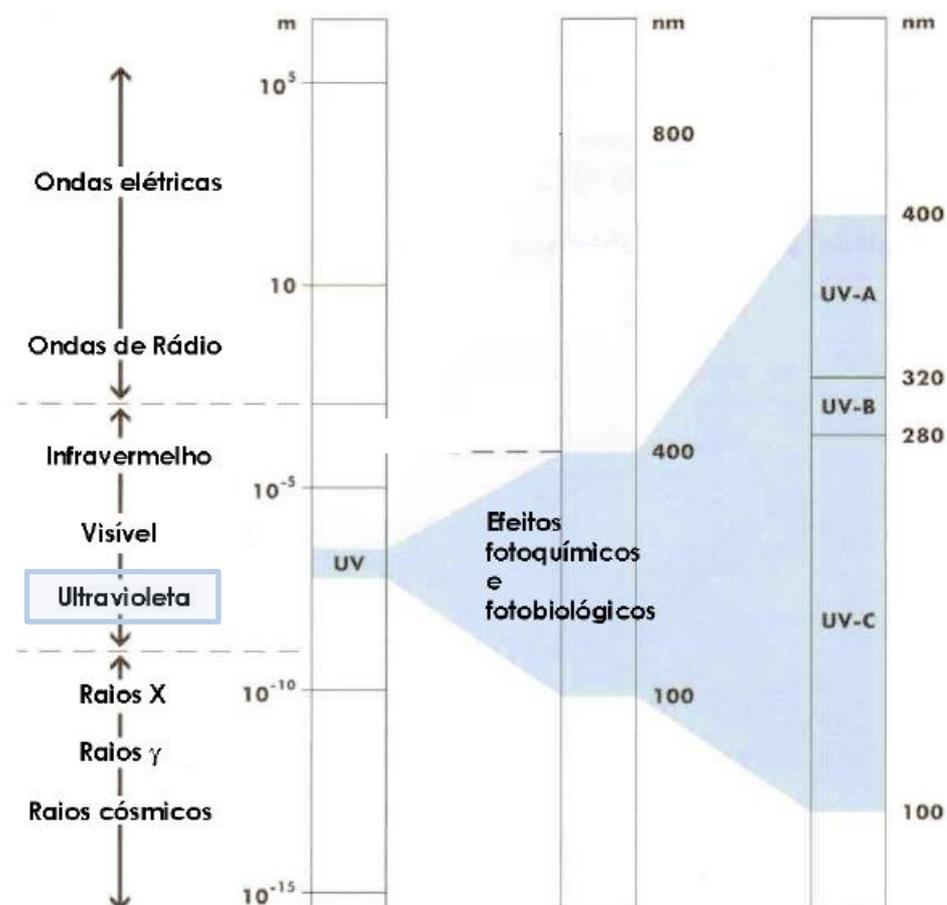


Figura 1 - Representação das primeiras faixas do espectro eletromagnético. Destaca-se as faixas de comprimento de onda de R-UV (UV-A, UV-B e UV-C) classificadas de acordo com seus diferentes efeitos fotoquímicos e fotobiológicos.

Fonte: adaptado de Corrêa (2003).

A R-UV corresponde ao intervalo de ondas localizado entre a região de radiação visível e a região dos raios-X do espectro eletromagnético. A R-UV compreende comprimentos de onda entre 100 e 400 nm. Em fotobiologia, a R-UV é dividida em três regiões: UVA (315 a 400 nm); UVB (280 a 315 nm) e UVC (100 a 280 nm). Essa divisão é baseada nas diferentes propriedades físicas de cada intervalo de comprimento de onda e seu respectivo potencial para causar efeitos biológicos (DIFFEY, 2002).

Cerca de 8 a 10 % da radiação solar que atinge o topo da atmosfera compreende a banda da R-UV, distribuída em, aproximadamente, 6 a 7 % na região do UVA, 1 a 2% na região do UVB e menos de 0,5% na região do UVC. Porém, na superfície da Terra, a R-UV é composta, aproximadamente, por 95 a 98% de R-UVA, 2 a 5% de R-UVB e nenhuma quantidade de R-UVC. A quantidade e distribuição da R-UV que atingem a superfície da Terra dependem de vários fatores como ângulo zênital do sol, latitude, estação do ano, concentração de ozônio, poluição, cobertura de nuvens e altitude.

### **2.1.2. Interação da R-UV com a atmosfera e a superfície**

As principais variáveis que afetam a intensidade e distribuição da irradiância (fluxo radiante que atinge uma superfície) da R-UV em superfície podem ser descritas como geométricas e geofísicas. A distância da Terra em relação ao Sol, o ângulo zenital solar, o horário e a localização são intituladas como variáveis geométricas. As variáveis geofísicas estão relacionadas aos componentes atmosféricos que absorvem ou espalham a radiação. Inúmeros aerossóis presentes na atmosfera, como, por exemplo, o dióxido de nitrogênio, o dióxido de enxofre, o ozônio, entre outros, são componentes que absorvem radiação. As variáveis que promovem o espalhamento da radiação são: aerossóis não absorventes, nuvens, cobertura de neve e gelo. As variáveis geométricas e geofísicas citadas são resumidamente explicadas em tópicos a seguir (KERR, 2003):

- Distância da Terra em relação ao Sol: A intensidade da radiação solar é proporcional ao inverso do quadrado da distância entre a Terra e o Sol. A Terra encontra-se mais próxima do Sol (periélio) no início de janeiro e mais distante (afélio) no início de mês de julho. A variação na intensidade da radiação solar entre esses dois períodos do ano para todos os comprimentos de onda é de no máximo 7%.

- Ângulo zenital solar: A inclinação dos raios solares (medida em ângulo zenital) é o principal fator que determina a intensidade de R-UV. O ângulo zenital solar é o ângulo de inclinação dos raios solares em relação ao zênite, linha imaginária que parte do observador na vertical. Para ângulos zenitais pequenos, os raios solares incidem quase que perpendicularmente sobre uma superfície. Portanto, para uma mesma condição atmosférica, quanto menor for o ângulo zenital, maior será a intensidade de radiação solar em superfície.

- Aerossóis: Em geral, as principais interações entre a radiação e os aerossóis são absorção e, principalmente, o espalhamento. Ao atravessar uma camada de aerossóis, a R-UV é atenuada e pode-se observar, em alguns casos, diminuição do IUV. O estudo dos efeitos dos aerossóis sobre a R-UV é complexo devido a sua grande variabilidade temporal e espacial.

- Albedo da superfície: As principais interações da radiação com a superfície são absorção e reflexão. O albedo é a propriedade de refletância de uma superfície e depende de sua composição. Quanto maior o albedo da superfície, maior é a capacidade da superfície em refletir radiação.

- Nuvens: A cobertura de nuvens é um dos fatores mais importantes que afeta a R-UV em superfície. A presença de nuvens geralmente tende a reduzir a irradiância de R-UV na superfície. O efeito da cobertura de nuvens é altamente variável dependendo da quantidade e cobertura, morfologia, distribuição de tamanho e de partículas das nuvens. Em condições fortemente nubladas a redução de R-UV que atinge a superfície pode ser reduzida em 95%.

- Altitude: A altitude é outro fator importante que influencia a R-UV que alcança a superfície. Em condições de céu claro, a R-UV aumenta gradativamente sob efeito da altitude. A relação entre o aumento da intensidade de R-UV e o aumento da altitude tende a ser exponencial. Em média, a cada 1000 metros de elevação na altitude ocorre um aumento de 8% a 10% na intensidade de R-UV. O efeito da altitude, sob condições de céu claro, depende do comprimento de onda, elevação solar, turbidez atmosférica e do albedo do terreno (BLUMTHALER *et al.*, 1997; RIGEL *et al.*, 1999; ACEITUNO-MADERA *et al.*, 2011).

- Ozônio: O ozônio (O<sub>3</sub>) é o principal componente atmosférico de proteção à R-UV emitida pelo Sol (Björn e McKenzie, 2002). A formação da camada de ozônio, há aproximadamente dois bilhões de anos, possibilitou a conquista do ambiente terrestre pelas espécies, antes confinadas ao ambiente marinho (GODIN-BEEKMANN, 2010). A atmosfera

forma um escudo protetor para a biosfera que ajuda a sustentar a vida no planeta contribuindo na manutenção da temperatura, proteção contra radiação e meteoros, entre outros.

O ozônio estratosférico é o principal responsável pela absorção da R-UV. Os comprimentos de onda menores que 280 nm, faixa da R-UVC, são quase completamente absorvidos por esse ozônio da estratosfera e, também, pelo oxigênio molecular. A quantidade de R-UVB que atinge a superfície também depende do conteúdo de ozônio e, além desse gás, da concentração de aerossóis, do espalhamento molecular e da cobertura de nuvens. A radiação de comprimento de onda superior a 315 nm (R-UVA) é pouco absorvida pelo ozônio, o que implica em maiores quantidades de energia nessa faixa do espectro atingindo a superfície terrestre (NUNEZ *et al.*, 1994).

O conteúdo vertical de ozônio, representado pela quantidade total de ozônio da superfície até o topo da atmosfera, é expresso em unidades de Dobson (DU). Um valor de 100 DU corresponde a uma camada vertical de 1 mm de espessura de ozônio, com base de 1 m<sup>2</sup>, sob pressão de uma atmosfera a zero graus Celsius (BJÖRN, 2006). A tropopausa indica o limite inferior da camada de ozônio e está localizada a, aproximadamente, 15 km em baixas latitudes, e abaixo de 9 km em altas latitudes. O ozônio é transportado da sua fonte principal nos trópicos para as regiões polares. Esse processo estabelece a distribuição latitudinal do ozônio, apresentando máximos nos meses de primavera em ambos os hemisférios (PETER, 1994).

A destruição e reconstituição da camada de ozônio é um processo natural, conhecido como ciclo de Chapman. Em níveis superiores a 30 km, no topo da estratosfera, moléculas de oxigênio (O<sub>2</sub>) são dissociadas pela R-UV (comprimento de onda menor que 242 nm) em moléculas de oxigênio atômico (O). Na presença de outras moléculas, o oxigênio atômico reage rapidamente com a molécula de O<sub>2</sub> formando moléculas de ozônio. As moléculas de ozônio ao absorverem a R-UV de comprimentos de onda superiores a 320 nm são novamente dissociadas em O e O<sub>2</sub> (CHAPMAN, 1942).

No entanto, a partir da década de 1970 diversas medições constataram que o ozônio estratosférico estava diminuindo em todo o globo. No período de 1996-2009 foi observada uma diminuição média de 4% do ozônio comparado a 1980. Em altas latitudes no hemisfério sul, essa diminuição foi maior que 40% nos meses de outubro (AUCAMP *et al.*, 2011). Esse fenômeno, conhecido como “buraco da camada de ozônio” trouxe apreensão à comunidade

científica e médica em todo o planeta. O motivo da depleção acelerada do ozônio é que o equilíbrio da reação de destruição e reconstituição do ozônio foi alterado com a emissão de compostos cloro-flúor-carbono (CFCs) e outras substâncias destruidoras da camada de ozônio. Na estratosfera, a R-UV promove a fotólise das moléculas de CFC, cuja decomposição libera cloro (Cl), o qual catalisa as reações que destroem as moléculas de ozônio (FARMAN *et al.*, 1985; SOLOMON *et al.* 1986).

A implementação do Protocolo de Montreal promoveu a diminuição substancial da concentração de gases destruidores da camada de ozônio – substâncias do grupo carbono: metano, monóxido de carbono e dióxido de carbono; óxido nitroso; substâncias do grupo cloro e bromo: alcanos parcialmente ou completamente halogenados - sendo esperada a recomposição desta camada nas próximas décadas. O aumento da concentração de ozônio e recuperação da camada ao longo do século XXI é consenso entre a comunidade científica. Contudo, ainda há poucas pesquisas sobre o comportamento do ozônio relacionado às mudanças climáticas (NEWMAN e MCKENZIE, 2011).

### **2.1.3. R-UV e saúde**

A radiação solar é a principal fonte de energia para o desenvolvimento e manutenção da vida na Terra. A exposição humana à R-UV é influenciada por inúmeros fatores, tais como comportamento pessoal (exposição proposital – bronzamento), o uso de medidas preventivas e de defesa, ocupação (atividade laboral), atividades recreacionais ao ar livre, dentre outras (TENKATE, 1998).

No ambiente natural, a R-UV é o carcinógeno ao qual a população mundial está inevitavelmente exposta. No processo evolutivo, enfatizando os seres humanos, a R-UV pode ser considerada uma pressão de seleção natural evidenciada pela adaptação da pele ao estresse causado pela radiação. As peles mais pigmentadas conferem maior proteção quando comparada à pele branca caucasiana. Ao longo do século XX houve grande aumento do número de casos de câncer de pele, com maior incidência em indivíduos brancos caucasianos (GRUIJL, 1999).

A pele, maior órgão do ser humano, forma uma barreira de proteção entre o organismo e o meio ambiente. Além de conferir proteção física, a pele apresenta outras funções

importantes como secreção, excreção, regulação da temperatura, proteção contra R-UV, síntese de vitamina D, entre outras. A pele consiste basicamente em duas camadas: epiderme e derme.

A epiderme é a camada mais externa, não é vascularizada e os tipos celulares constituintes são divididos em queratinócitos e não-queratinócitos. Os queratinócitos são as células mais abundantes da epiderme e são responsáveis pela produção de queratina (proteína fibrosa que confere proteção e resistência à pele). Dentre os não-queratinócitos, encontram-se na epiderme os melanócitos, as células de Langerhans e as células de Merkel. As células de Langerhans são células apresentadoras de antígenos durante a indução das respostas do sistema imunológico, e as células de Merkel são especializadas na transdução sensorial. Abaixo da epiderme, está situada a derme.

A derme é extensamente vascularizada. Apresenta canais linfáticos e nervos sensoriais. É composta por diferentes tipos celulares (fibroblastos, linfócitos, células plasmáticas, entre outras) e compostos intersticiais. Os fibroblastos são as células mais abundantes da derme e secretam colágeno, elastina e proteoglicanas. As fibras de colágeno e elastina conferem à pele elasticidade. Durante o processo de envelhecimento, as propriedades das fibras colágeno e elastina mudam quantitativamente e qualitativamente (SCHERER e KUMAR, 2010; LAI-CHEONG e MCGRATH, 2013).

A pele apresenta dois mecanismos que conferem proteção ao organismo contra a R-UV. O primeiro mecanismo ocorre na camada córnea, onde as células mortas ricas em queratina refletem a radiação, diminuindo a dose de exposição. A segunda maneira é aumentando a atividade dos melanócitos, o que aumenta a produção e transferência de melanina para os queratinócitos. Esse mecanismo diminui a absorção da R-UV (VENUS, WATERMAN e MCNAB, 2011).

Os melanócitos são responsáveis pela pigmentação da pele, olhos e cabelo, além de protegerem contra a R-UV. O pigmento produzido pelo melanócito é genericamente denominado melanina. O número de melanócitos é relativamente constante. As diferenças de pigmentação entre indivíduos estão relacionadas à distribuição, composição e quantidade de melanossomas - grânulos de pigmento de melanina (LIN e FISHER, 2007).

A fotoproteção da melanina é proporcional à quantidade de melanina na pele. Observa-se que indivíduos com maior quantidade de melanina (pele escura) são mais

protegidos dos danos causados pela R-UV quando comparados a indivíduos de pele clara (BRENNER e HEARING, 2008).

As respostas da pele à R-UV podem ser classificadas de acordo com os efeitos provocados - efeitos crônicos ou agudos. Os efeitos agudos são eritema, pigmentação melânica (bronzamento) e produção de vitamina D. Os efeitos crônicos, câncer de pele e envelhecimento precoce, são resultantes de reações induzidas repetidamente ou por grande período de tempo (DIFFEY, 1980).

O principal efeito benéfico da R-UV na pele é a reação fotoquímica que leva à síntese da vitamina D<sub>3</sub>. O precursor de vitamina D 7-desidrocolesterol, presente na pele, absorve a radiação em comprimentos de ondas inferiores a 320 nm e é convertido em vitamina D ativa (vitamina D<sub>3</sub>). Os efeitos benéficos da vitamina D incluem: manutenção de um esqueleto saudável ao participar do metabolismo de cálcio e fósforo; efeito anti-carcinogênico; redução da hipertensão arterial, efeito regulatório positivo no sistema imunológico (ENGELSEN, 2010; CHRISTAKOS *et al.*, 2013).

Bickle (2012) discute a importância da vitamina D em limitar o desenvolvimento de células cancerosas na pele induzida pela exposição à R-UV. A vitamina D também pode promover a supressão e prevenir o desenvolvimento de outros tipos de câncer. O uso de vitamina D como adjunto no tratamento de câncer de pâncreas (SHERMAN *et al.*, 2014), próstata (FANG *et al.*, 2011) e mama (ALIMIRAH *et al.*, 2011) tem apresentado resultados positivos no prognóstico destas doenças.

A principal função da vitamina D é manter a concentração de fósforo e cálcio, ambos importantes para constituição óssea e metabolismo celular. A deficiência de vitamina D é um dos problemas de saúde mais comuns e de difícil diagnóstico já que não apresenta sintomas clínicos clássicos. A luz do Sol é a melhor fonte para síntese de vitamina D, a qual depende da absorção de R-UVB pela pele e é influenciada pela idade, gênero e cor da pele. Estilo de vida, dieta, cultura (vestuário) são os principais fatores que influenciam a produção de vitamina D. Em relação ao gênero, observa-se que as mulheres de todas as faixas etárias (crianças, adolescentes e adultas) apresentam menores níveis de vitamina D quando comparada ao gênero masculino. E, em relação à idade, indivíduos com mais de 75 anos apresentam significativa diminuição da produção de vitamina D (HAGENAU *et al.*, 2008).

A R-UV é o principal fator ambiental que pode causar danos à pele. A R-UVC proveniente do Sol é completamente filtrada pela atmosfera terrestre e, portanto, não representa fonte de risco à saúde humana. Já a R-UVB ultrapassa a epiderme e penetra superficialmente a derme. A R-UVA penetra mais profundamente, atingindo a camada basal (Figura 2). A R-UVA pode causar envelhecimento precoce, imunossupressão<sup>1</sup> em humanos e câncer de pele. A R-UVB pode causar eritemas e, assim como a R-UVA, também está relacionada aos casos de câncer de pele e imunossupressão. Todavia, a R-UVB também apresenta um benefício fundamental à saúde humana: a síntese de vitamina D (GALLAGHER e LEE, 2006).

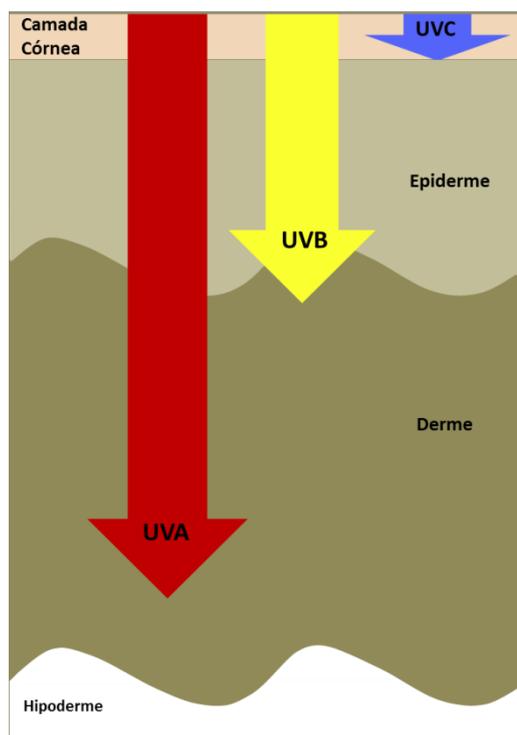


Figura 2 - Comprimentos de onda de R-UV e profundidade de penetração na pele.  
Fonte: adaptado de Baron e Suggs (2014).

Matsumura e Ananthaswamy (2004) discutem efeitos maléficos de curto e longo prazo da R-UV à pele humana (esquematisados na Figura 3). As lesões de curto prazo são: danos ao DNA (ácido desoxirribonucleico) podendo implicar em mutações; queimaduras (eritema, pele vermelha); bronzeamento e imunodeficiência. O envelhecimento precoce, neoplasias da pele melanomas e não-melanomas são exemplos dos possíveis danos resultantes da exposição de longo prazo à R-UV.

<sup>1</sup> Redução da atividade ou eficiência do sistema imunológico.

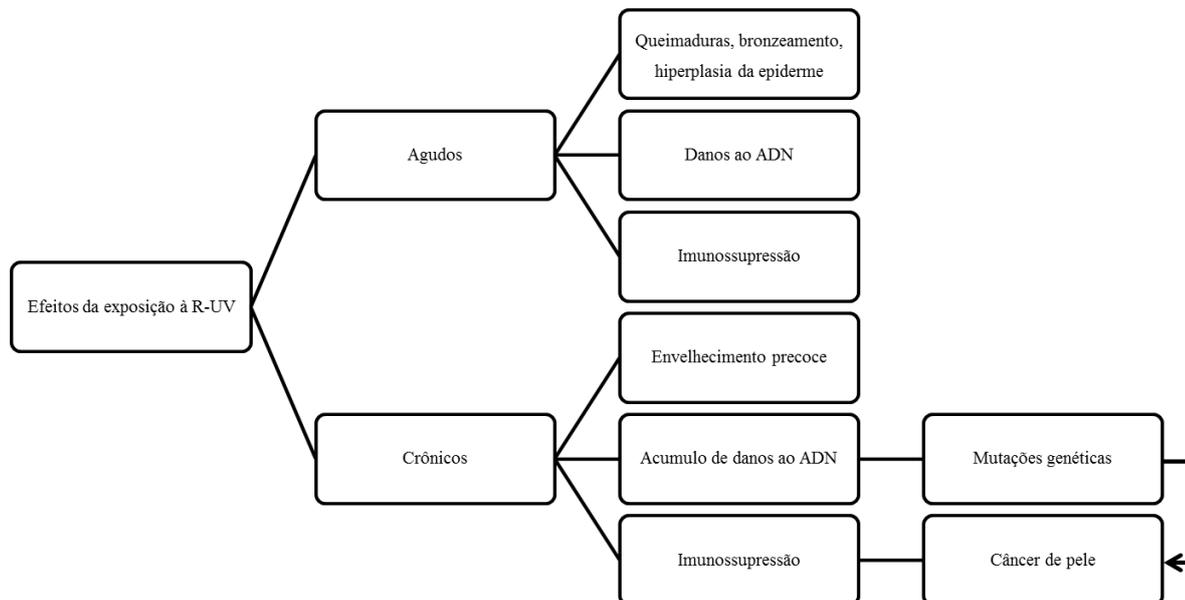


Figura 3 - Efeitos agudos e crônicos da R-UV sob a pele.  
Fonte: adaptado de Matsumura (2004).

Danos irreparáveis ao DNA podem implicar em diversas consequências biológicas. Os danos mais óbvios são mutações no DNA e consequente aumento no risco de desenvolver câncer. Marrot e Meunier (2008), discutem as principais consequências biológicas desencadeadas devido à fotodanos ao DNA: fotocarcinogênese, eritema, imunossupressão e melanogênese. Estas principais consequências são resumidamente descritas abaixo.

- Fotocarcinogênese: Mutações no DNA promovem a expressão de gene supressor de tumor que irão induzir o reparo ou morte celular (apoptose). A exposição à R-UV pode causar lesões no DNA e causar inativação ou superativação de genes que podem levar ao aumento do crescimento e proliferação celular.

- Eritema: O eritema pode ser desencadeado devido aos danos causados ao DNA por exposição à radiação UVB e ondas curtas de UVA.

- Foto-imunossupressão: Danos ao DNA devido à R-UV podem induzir a produção de mediadores imunossupressores pelos queratinócitos. A liberação dos mediadores inibe o funcionamento das células de Langerhans e posterior neutralização de anticorpos. O

enfraquecimento do sistema imunológico além de propiciar o desenvolvimento de outras doenças, implica em maior risco de desenvolver câncer de pele.

- Melanogênese: A melanogênese, ou bronzeamento, consiste em uma resposta direta dos melanócitos expostos à R-UV e indireta dos queratinócitos. Os queratinócitos expostos à R-UVB produzem um hormônio estimulador de melanina. Este hormônio além de estimular a melanogênese, melhora o mecanismo de reparo do DNA dos melanócitos.

Danos temporários, como queimaduras e bronzeamento deixam a camada córnea, a epiderme e a derme mais delgadas, além de poder causar edema e prurido. Em casos de bronzeamento e queimaduras repetitivas os danos histológicos podem ser permanentes causando fotoenvelhecimento (AMBACH e BLUMTHALER, 1993).

O fotoenvelhecimento resulta em envelhecimento precoce da pele e é diretamente associado a danos acumulados devido à exposição ao Sol. Tanto a R-UVA quanto a R-UVB causam o fotoenvelhecimento, porém a R-UVA tem maior contribuição ao processo por penetrar mais profundamente na derme. As principais manifestações clínicas do fotoenvelhecimento são: rugas, epiderme e derme mais delgadas, perda capilar, diminuição na produção de fibras elásticas, alteração na organização e no tamanho das fibras colágenas, ressecamento, menor quantidade de melanócitos, entre outras (MONTAGNER E COSTA, 2009; HAN, CHIEN e KANG, 2014).

As neoplasias cutânea (câncer) podem ser não-malignas, comumente denominada como não-melanoma, ou malignas (melanomas). O câncer de pele não-melanoma é tipo de câncer mais comum nos seres humanos. Os carcinomas basocelular e espinocelular são não-melanomas originados de linhagens de queratinócitos. Os carcinomas basocelular apresentam crescimento lento, podem provocar perda de tecido epitelial e raramente entram em metástase. O carcinoma espinocelular é mais invasivo que o basocelular, é considerado pré-maligno por apresentar maior possibilidade de metástase (MADAN, LEAR e SZEIMIES, 2010).

O melanoma cutâneo ocorre devido ao acúmulo de anormalidades no DNA dos melanócitos. Essas anormalidades promovem rápida proliferação celular, estimula o desenvolvimento de vasos sanguíneos e invasão do tumor, sucedendo, frequentemente em metástase (THOMPSON, SCOLYER e KEFFORD, 2005; LACY e ALWAN, 2013).

Além da pele, os olhos também sofrem injúrias da exposição ao sol. As doenças oculares causadas pela exposição à R-UV podem provocar desde uma simples inflamação até a perda da visão. As principais doenças são: fotoqueratite (inflamação da córnea), pterígio (desenvolvimento de membrana fibro-vascular sobre a córnea), pingüécula (degeneração da conjuntiva e formação de lesão), catarata (desnaturação das proteínas oculares que altera a transparência do cristalino), degeneração da mácula e câncer (KARPECKI, 2012).

Em geral, os efeitos sobre a pele humana são utilizados como referência para estudos sobre os impactos da R-UV sobre a saúde. Para tanto, classifica-se a pele humana em fototipos relacionados ao tipo de resposta quando exposta à R-UV. Na Tabela 1 estão descritos seis tipos de pele classificados de acordo com a coloração, a capacidade de bronzeamento, e a susceptibilidade à queimadura e câncer de pele (FITZPATRICK, 1988). Peles pouco pigmentadas são mais suscetíveis aos efeitos maléficos da exposição à R-UV, enquanto que as peles mais pigmentadas representam maior proteção e menor susceptibilidade aos efeitos crônicos e agudos (YOUNG, 2006; PHARMD *et al.*, 2013).

Tabela 1- Classificação do tipo de pele humana de acordo com os efeitos agudos e crônicos relativos à exposição solar.

Tipo de pele	Cor da pele	Capacidade de bronzeamento	Susceptibilidade à queimadura	Susceptibilidade ao câncer de pele
I	Branca	Muito difícil	Alta	Alta
II	Branca	Difícil	Alta	Alta
III	Branca	Boa	Moderada	Moderada
IV	Oliva	Muito boa	Baixa	Baixa
V	Marrom	Muito boa	Muito baixa	Muito baixa
VI	Negra	Muito boa	Muito baixa	Muito baixa

Fonte: adaptado de Fitzpatrick (1988)

As doses mínimas de R-UVB e R-UVA necessárias para produzir eritema (E-UV) variam de acordo com o fototipo do indivíduo. Quanto maior a sensibilidade da pele, menor é a quantidade de radiação necessária para causar eritema. Abaixo, na Tabela 2, estão descritas as doses mínimas eritematosas para cada fototipo.

Tabela 2 – Tipos de pele e quantidade de radiação UVB e UVA necessária para produzir eritema.

Tipo de pele	UVB	UVA
	Doses mínimas (mJ/cm <sup>2</sup> )	Doses mínimas (mJ/cm <sup>2</sup> )
I	15-30	20-35
II	25-40	30-45
III	30-50	40-55
IV	45-60	50-80
V	65-90	70-100
VI	90-150	<100

Fonte: adaptado de Blacutt (2002)

O tempo de exposição ao Sol suficiente para causar danos à pele varia entre os fototipos. Entretanto, não é possível recomendar ou propor um tempo de exposição seguro, pois essa tarefa envolve algumas complicações. Em primeiro lugar, a energia recebida pela pele tem efeito cumulativo e também pode desencadear outros efeitos nocivos ao organismo. Em segundo, o tempo de exposição depende do fototipo e esta classificação é subjetiva e suscetível a erros de avaliação. Por último, fatores fisiológicos, ambientais e geográficos interferem bastante sobre tempo de exposição seguro para pessoas de um mesmo fototipo.

Como descrito, a sensibilidade à R-UV varia entre indivíduos, pois depende da capacidade da pele para absorver energia. A sensibilidade individual é frequentemente estimada pela dose eritematosa mínima (MED, do inglês *minimum erythema dose*), definida como a dose mínima para causar eritema (vermelhidão) 24 horas após a exposição ao sol. A resposta ao eritema pode ser expressa em função da dose biológica a MED, ou em dose física como dose eritematosa padrão (SED, do inglês *standard erythema dose*) (HARRISON e YOUNG, 2002).

A SED é designada para exposição à R-UV (natural ou artificial) efetiva para causar eritema, sendo determinado que 1 SED é o equivalente a MED de 100 J/m<sup>2</sup> (DIFFEY *et al.*, 1997). A MED varia de acordo com cada tipo de pele. Por exemplo, a MED para peles sensíveis à R-UV é aproximadamente 2 SED. Peles menos sensíveis, a MED é aproximadamente 10 SED (MCKENZIE *et al.*, 2010).

#### 2.1.4. O Índice Ultravioleta

O índice ultravioleta (IUV) foi criado com o propósito de informar o público em geral de maneira objetiva sobre a R-UV em superfície e o risco de exposição. O IUV é uma medida simples que indica o nível de dano causado pela R-UV em superfície ponderada pelo efeito de eritema. A divulgação do IUV é uma ferramenta educativa para as pessoas adotarem medidas preventivas quando expostas a R-UV (FIOLETOV *et al.*, 2010; SIN *et al.*, 2013)

VANICEK *et al.* (1999) definem que o IUV é uma unidade de medida de níveis de R-UV significativos para saúde humana. O IUV é expresso numericamente pela irradiância efetiva ponderada multiplicada por 40. A irradiância efetiva é dada pela integração da irradiância espectral pelo espectro de ação eritêmico no intervalo de comprimentos de onda de 280 a 400 nm. O espectro de ação especifica a efetividade relativa de um determinado comprimento de onda em provocar uma resposta biológica singular, visto que diferentes processos fotoquímicos e fotobiológicos respondem de maneira peculiar a diferentes regiões do espectro UV. Os mesmos autores ressaltam que quando uma pessoa se expõe à radiação solar, ela recebe energia que ao longo de um período de tempo pode suceder em eritema. Essa radiação solar recebida pode ser medida como irradiância ou como exposição radiante. A irradiância é definida como a quantidade de energia que atinge uma determinada superfície ( $\text{W}/\text{m}^2$ ), também conhecida como densidade radiante. A exposição radiante ou dose, como descrita anteriormente, está relacionada com a quantidade de energia por unidade de superfície que uma pessoa pode receber ao se expor por um intervalo de tempo à R-UV.

O IUV independe do tipo de pele e seu principal objetivo é alertar a população sobre os riscos e danos causados pela exposição à R-UV e informar sobre a necessidade de aplicar medidas preventivas (BLACUTT, 2002).

Os valores do IUV são adimensionais e variam em uma escala de 1 a 11+, e quanto mais alto é o valor, maior é o risco de danos à saúde. O IUV pode ser classificado de baixo a extremo, agrupando-se os valores em categorias: baixo ( $\text{IUV} < 2$ ); moderado (3 a 5); alto (6 a 7); muito alto (8 a 10); extremo ( $\text{IUV} \geq 11$ ). Para promover o comportamento adequado da população exposta à R-UV, medidas preventivas são associadas aos valores do IUV, como a recomendação de procedimentos e uso de acessórios em situações de exposição inevitável. A Figura 4 ilustra as mensagens e recomendações para diferentes valores de IUV (WHO, 2002).

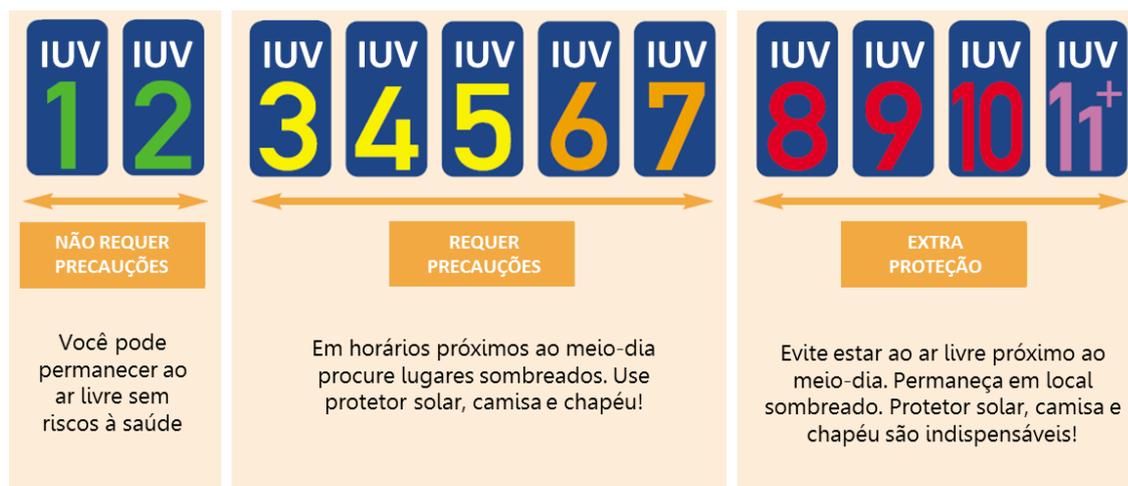


Figura 4 - Classificação do IUV e proteções recomendadas.  
Fonte: adaptado de WHO (2002)

## 2.2. Projeções da R-UV em função das mudanças climáticas.

### 2.2.1. O IPCC

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC*) foi consolidado em 1988 pela Organização Meteorológica Mundial e o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA). Desde então, o IPCC é responsável pela elaboração, com base em dados científicos, das avaliações sobre todos os aspectos das mudanças climáticas e seus impactos. O Quinto Relatório de Avaliação (AR5) do IPCC compila as mais recentes atualizações sobre as Mudanças Climáticas (CUBASH *et al.*, 2013).

Foram desenvolvidos quatro novos cenários para as emissões futuras de gases de efeito estufa e aerossóis para o CMIP5 (*Coupled Model Intercomparison Project*). Estes cenários representam diferentes forçantes climáticas, denominados RCPs (*Representative Concentration Pathways*) e suas extensões além de 2100, os ECPs (*Extended Concentration Pathways*), foram idealizados para explorar as possíveis direções do clima futuro conduzidas pelas atividades antropogênicas.

Os quatro cenários foram desenvolvidos com a combinação de um conjunto de observações e as estimativas de emissões de gases de efeito estufa (GEE) por meio do período histórico (1750-2005), com emissões projetadas para quatro diferentes modelos de avaliação

integrada para 2005-2100. Nestes cenários, as possíveis alterações no sistema terra-atmosfera são concebidas pelos valores das forçantes radiativas, as quais compreendem valores entre 2,6 e 8,5  $\text{W}/\text{m}^2$ . O comportamento das forçantes radiativas para os quatro cenários está ilustrado na Figura 5 (MEINSHAUSEN *et al.*, 2011).

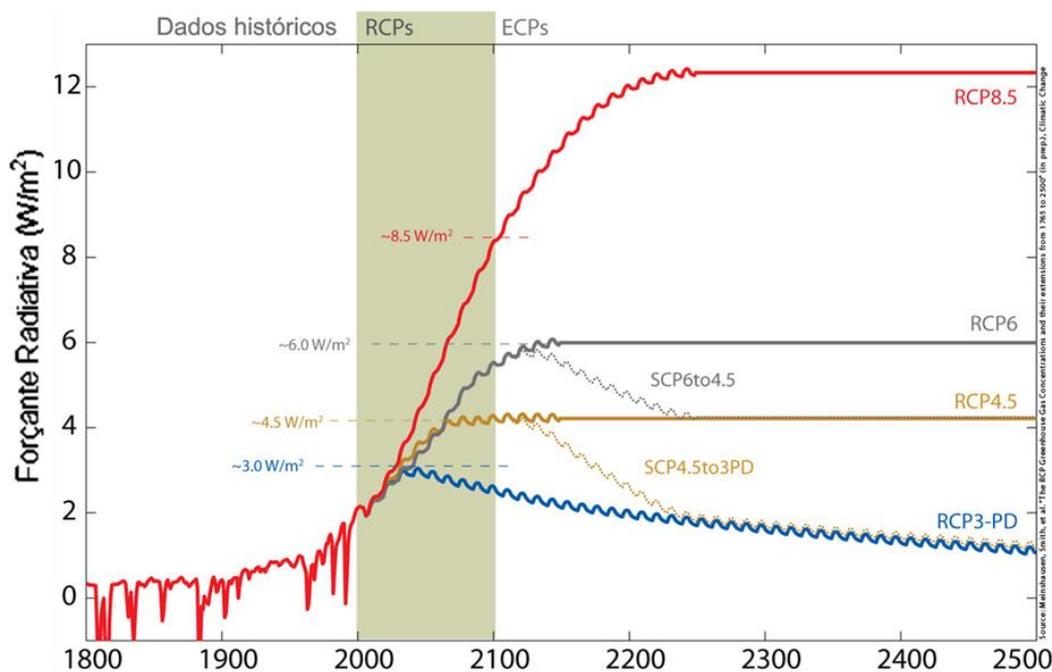


Figura 5 - Forçante radiativa total para os RCP  
Fonte: Meinshausen *et al.*, 2011 (Adaptada)

O RCP 2.6 representa um cenário de forte mitigação nas emissões de GEEs e as assume como constantes após 2100. Nesta circunstância, a forçante radiativa atinge um valor de cerca de 3.0  $\text{W}/\text{m}^2$  em meados do século XXI e retrocede a 2.6  $\text{W}/\text{m}^2$  no final deste. Os RCPs 4.5 e 6.0 representam cenários intermediários de emissões de GEEs até o final do século. Os cenários intermediários apresentam estabilidade na concentração de GEEs após 2100. O cenário RCP 8.5 é composto pelo aumento significativo das emissões de GEEs ao longo do século XXI. As principais características de cada RCP estão representadas na Tabela 3 (VAN VUUREN *et al.*, 2011).

Tabela 3 - Principais características de cada RCP (Fonte: Van Vuuren *et al.*, 2011).

Componentes dos cenários	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6.0	RCP 8.5
Emissões de gases de efeito estufa	Muito baixas	Mitigação média- baixa; Patamar médio	Mitigação alta; Patamar baixo	Patamar alto
Áreas agrícolas	Médias para terras agrícolas e pastagens	Muito baixas para terras agrícolas e pastagens	Total baixo: médias para terras agrícolas e muito baixas para pastagens	Médias para terras agrícolas e pastagens
Poluição do ar	Média-baixa	Média	Média	Média-alta

### 2.2.2. CMIP5

O projeto CMIP5 foi idealizado durante as últimas fases do 4º Relatório de Avaliação (AR4) do IPCC. Este projeto envolveu diversos grupos de modelagem climática ao redor do mundo, incluindo também a participação de modelos atmosféricos autônomos. O CMIP5 foi delineado para integrar uma variedade de experiências para aprimorar as simulações dos modelos climático. As simulações são mais complexas e realistas, comparadas aos projetos anteriores (CMIP3), a fim de melhorar a compreensão dos resultados (HIBBARD, MEEHL e COX, 2007).

O âmbito de CMIP5 compreende as experiências de longo prazo dos modelos de circulação global acoplando oceano-atmosfera (*Atmosphere-Ocean Global Circulation Models* – AOGCM) orientados por quatro cenários climáticos de emissão conduzida experimentais (Modelo do Sistema Terrestre). Ambos modelos são utilizados para analisar a sensibilidade de retroalimentação do ciclo do carbono. Além dos experimentos de longo prazo, o CMIP5 incorpora experimento de curto prazo para o ano de 2035 e simulações decenais (TAYLOR, STOUFFER e MEEHL, 2012).

Em suma, o CMIP5 tem como principais objetivos: fornecer projeções de futuras mudanças climáticas em duas escalas de tempo, curto prazo (para 2035) e longo prazo (para 2100 e além); avaliar a credibilidade dos modelos na simulação do passado recente; e compreender alguns dos fatores responsáveis pelas diferenças na retroalimentação dos modelos associadas ao ciclo do carbono e cobertura de nuvens (WCRP, 2011).

De acordo com Flato *et al.* (2013), desde o AR4 surgiram mais evidências das implicações climáticas associadas ao conteúdo de ozônio estratosférico. Por exemplo, a diminuição de ozônio nas regiões dos polos desencadeou o fortalecimento do jato troposférico em médias latitudes no Hemisfério Sul durante o verão. No entanto, cerca de metade dos modelos CMIP3 (fase 3 do CMIP, anterior à fase 5- CMIP5) prescreveram o ozônio como uma variável de valor fixo climatológico, e dessa forma estes modelos não simulam tendências climáticas atribuíveis à superfície associada às variações na quantidade do ozônio estratosférico.

Os mesmos autores ressaltam que a partir do 5º Relatório de Avaliação (AR5) muitos modelos do CMIP5 passaram a tratar a química da estratosfera mais interativamente, considerando os prognósticos de ozônio e outros constituintes químicos da estratosfera. Nas simulações recentes do CMIP5 foram adicionados novos aspectos atmosféricos e interações químicas climáticas. Um novo conjunto de dados de ozônio variável no tempo foi desenvolvido e prescrito para a maioria dos modelos. Além das repostas climáticas associadas às variações de ozônio, pode-se calcular a própria evolução de ozônio ao longo do tempo. Como resultado, grande parte dos modelos do CMIP5 consideram os efeitos de destruição do ozônio estratosférico e suas implicações sobre o clima em superfície no hemisfério Sul.

## **3. Dados e Metodologia**

### **3.1. Área de Estudo**

Foram escolhidas dez localidades de estudo: nove cidades sul-americanas (figura 6) e a base científica brasileira na Antártida. As características das áreas selecionadas são apresentadas na tabela 4. A escolha teve como foco principal observar o comportamento do ozônio em função da latitude e, portanto, abranger o máximo de localidades de diferentes latitudes.

Além da distribuição latitudinal, a escolha das cidades brasileiras foi baseada em outros dois critérios: abranger todas as regiões do país e localidades com alto número de casos de câncer de pele. Para observar o efeito em altitude foi escolhida a cidade de La Paz na Bolívia.



Figura 6 - Mapa da América do Sul destacando as cidades escolhidas para o estudo.

Tabela 4 - Caracterização das áreas de estudo: coordenadas geográficas, número de habitantes e número de casos de câncer de pele (melanoma e não melanoma).

Localidade	Latitude	Longitude	População	Casos de câncer - Taxa bruta		Novos casos de câncer*	
				Não melanoma	Melanoma	Não melanoma	Melanoma
Caracas	10,5	-66,9	6.000.000 <sup>a</sup>	S/R	S/R	S/R	S/R
Manaus	-3,1	-60,0	1.871.115 <sup>c</sup>	37.365	1.46	350	20**
Natal	-5,8	-35,2	829.860 <sup>c</sup>	38.835	1.72	160	***
Cuiabá	-15,6	-56,1	1.139.381 <sup>c</sup>	53.68	2.31	305	***
La Paz	-16,5	-68,2	2.839.946 <sup>b</sup>	S/R	S/R	S/R	S/R
São Paulo	-23,6	-46,6	11.722.391 <sup>c</sup>	122.535	7.3	7220	430
Porto Alegre	-30,0	-51,2	1.471.676 <sup>c</sup>	59.87	9.965	445	75
Buenos Aires	-34,6	-58,4	2.890.151 <sup>b</sup>	S/R	S/R	S/R	S/R
Ushuaia	-54,8	-68,3	56.825 <sup>b</sup>	S/R	S/R	S/R	S/R
Base Comandante Ferraz	-62,1	-58,4	64 ou 35 <sup>c,d</sup>	S/R	S/R	S/R	S/R

<sup>a</sup> Dados de 2011, Fonte: <http://www.ine.gov.ve/>; <sup>b</sup> Dados de 2010, Fonte: <http://www.ine.gob.bo/>; <sup>c</sup> Dados de 2010, Fonte: <http://www.ibge.gov.br/>; <sup>d</sup> Número máximo de pessoas no verão e inverno; \* Dados originais arredondados para 10 ou

múltiplos de 10; \*\* Ocorrência menor do que 15 casos para cada 100 mil mulheres; \*\*\* Ocorrência menor que 15 casos para cada 100 mil homens e para cada 100 mil mulheres; S/R: sem registro. Dados de câncer das cidades brasileiras, fonte: INCA (2015).

Grande parte do continente sul-americano encontra-se na região tropical, região caracterizada pela maior incidência de radiação por unidade de área. A América do Sul apresenta vasta amplitude latitudinal (12°N e 55°S), sendo que quatro quintos do continente ficam abaixo da linha do Equador. As populações dessas regiões, tropicais e subtropicais, estão constantemente expostas à radiação solar e, portanto, mais susceptíveis a desenvolverem doenças de pele e olhos causadas pela R-UV. Altos índices de R-UV são aferidos em grande parte da América do Sul ao longo de todo o ano (CORRÊA E PIRES, 2013; ZARATTI *et al.*, 2014).

Outro aspecto estimulante para o estudo de R-UV em superfície na América do Sul é sua proximidade da Antártida, onde o buraco na camada de ozônio faz-se presente entre o fim do inverno e parte da primavera. Conforme discutido anteriormente, o buraco na camada de ozônio é um fenômeno sazonal caracterizado pela grande perda de ozônio na região da baixa estratosfera, cuja redução da coluna total pode ser maior que 50%. Esse fenômeno ocorre devido às condições meteorológicas da região e é potencializado por ações antropogênicas (PETER, 1994).

A formação do buraco de ozônio ocorre no período da primavera no Hemisfério Sul, e corriqueiramente, as menores concentrações de ozônio ocorrem no mês de outubro. Diversos estudos associam baixas concentrações de ozônio em regiões ao sul do continente americano aos períodos de formação do buraco de ozônio, principalmente em anos de maior extensão do buraco (KIRCHHOFF *et al.* 1997; JONES *et al.*, 1998; CASICCIA *et al.*, 2003).

Rousseaux *et al.* (1999) descreveram níveis cada vez mais elevados de destruição da camada de ozônio na última década do século XX e observaram aumento de R-UV em superfície (latitude 55°) durante o período da primavera. Nas regiões mais ao sul do continente em questão, por exemplo, em Ushuaia, valores de CTO menores que 220 DU eram comuns apenas no período da primavera. Após 1990, foram constatados valores menores que 220 DU no inverno e no outono, além da primavera. Esses valores foram analisados por Diaz *et al.* (2006) na série temporal entre 1979-2004.

Outro problema para as populações das regiões mais austrais é a produção de vitamina D. DIAZ *et al.* (2011) observaram que durante três meses de inverno essas regiões não recebem

radiação suficiente para promover a produção de vitamina D. Em outras regiões próximas de latitudes um pouco menores, os níveis de radiação para síntese de vitamina D não foram alcançados em alguns dias no inverno.

Em La Paz, ao contrário das regiões austrais, observam-se os mais altos valores de IUV do planeta devido à elevada altitude. Dos 365 dias do ano, em 68% dos dias a população está sujeita a máximas diárias de IUV maiores que 10; todos os dias do ano, de céu claro, o IUV máximo excede 8 (COARITI *et al.*, 2010). De acordo com a OMS, valores de IUV superiores a 11 são considerados de extremo risco para saúde, podendo resultar em eritemas, câncer de pele ou outras doenças associadas.

No Brasil, o câncer de pele não melanoma é o tipo de câncer mais incidente na população. O número de novos casos de câncer tem aumentado a cada ano. Nas estimativas do INCA, em 2010 o número de novos casos de câncer de pele era aproximadamente 134 mil. Para os anos de 2014 e 2015 são estimados 189 mil novos casos de câncer de pele não melanoma, o que representa mais de 31% dos novos casos de câncer no país (INCA, 2014).

A alta incidência de câncer de pele no Brasil é reflexo dos altos IUV em grande parte do país. CORRÊA *et al.* (2003) observaram que, em torno do meio-dia solar, as médias sazonais de IUV são, em geral, altas e muito altas em quase todas as estações em quatro regiões brasileiras: Sudeste, Sul, Nordeste e Centro-Norte. Apenas nas regiões Sul e Sudeste foram observados IUV menores que 5, em torno do meio-dia solar, durante dias de céu claro, no inverno.

Em uma das regiões metropolitanas mais habitadas do mundo, São Paulo, o número de casos de câncer de pele tem aumentado anualmente. Corrêa e Ceballos (2010) observaram índices de R-UV altos em 75% das medições realizadas em torno do meio-dia solar durante os meses de verão. Além disso, ressaltam que a maior parte da população não apresenta comportamento adequado de proteção à R-UV.

Em diversas regiões do Brasil a população está sujeita a altas doses de R-UV. Na região Sudeste durante o verão, as doses acumuladas de E-UV podem exceder a 60 vezes a quantidade recomendada pela OMS. Em algumas cidades da região Nordeste um indivíduo pode receber cerca de sete vezes a dose de E-UV recomendada em apenas 20 minutos de exposição em dias de radiação solar intensa (CORRÊA e PIRES, 2013).

Em muitas cidades da região nordeste o IUV é extremo ao longo do ano todo em horários próximos ao meio-dia solar. Por exemplo, na cidade de Natal-RN, durante o período de 2001-2007 os registros do IUV variaram entre baixo (34,21%), moderado (65,7%) e alto (30,40%), e em todos os anos o IUV atingiu diariamente valores extremos (SANTOS *et al.*, 2011). Outro estudo realizado em Natal mostra que, no período de 2001-2011, o mês de março apresentou valores máximos de IUV e em 2007 foi a maior média diária de IUV do período estudado (LOPO, 2012).

Em contraste, no mesmo estudo supracitado (Santos *et al.*, 2011) sobre o IUV nas capitais brasileiras em 2007, observou-se na cidade de Porto Alegre os menores IUV dentre as capitais brasileiras (período de transição outono-inverno). No período que compreende o final do inverno até o final do verão, foram observadas médias de IUV superiores a 9. Mesmo situada em altas latitudes, Porto Alegre apresenta IUV, no período de verão, semelhante aos das cidades do Nordeste. A região Sul apresenta as maiores amplitudes sazonais de IUV.

Na região Norte, foram identificados danos biológicos decorrentes da exposição à R-UV. GROFF *et al.* (2010), observaram danos no DNA de três espécies de peixes típicos da Amazônia causada pela exposição à altos IUV. A R-UV além de afetar a saúde de outras espécies, pode suceder em desequilíbrio ecológico.

Em Cuiabá, as curvas das médias mensais de R-UV em superfície são congruentes às estações do ano. As médias de IUV foram moderadas no inverno, altas no outono e na primavera, e extremas no verão (SÁ *et al.*, 2004). A dinâmica de queimadas na região tem forte influência na R-UV que atinge a superfície. Durante o período de queima de biomassa, os aerossóis provenientes das queimadas interagem com a R-UV, e pode-se observar redução da radiação que chega à superfície (SAHAI *et al.*, 2001).

### **3.2. Modelos Climáticos**

Os modelos matemáticos do sistema climático são baseados em princípios físicos e reproduzem aspectos importantes do clima. O comportamento dos componentes do sistema climático e suas interações são determinados de forma quantitativa nos modelos. Esses modelos permitem a simulação de prováveis cenários de evolução do clima para vários cenários de

emissões dos Gases de Efeito Estufa (GEE). Dessa forma, a aplicação dos modelos contribui para os estudos de detecção e projeções futuras do clima (FLATO *et al.*, 2013).

Para o presente estudo foram utilizados quatro modelos climáticos: CCSM4, CSIRO-Mk3.6, IPSL-CM5A-LR e MIROC5. Os modelos foram selecionados de acordo com a base de dados desejada, a qual compreende a série de CTO de 2006-2100. Foram utilizados os dados de CTO dos quatro cenários climáticos (RCP) e dos quatro modelos climáticos (RCP). A descrição dos modelos encontra-se na tabela 5.

Tabela 5 - Descrição sumária dos modelos climáticos utilizados no estudo.

Modelo	Instituição
CCSM4	<i>US National Centre for Atmospheric Research</i>
CSIRO-Mk3.6	<i>Queensland Climate Change Centre of Excellence and Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation</i>
IPSL- CM5A-LR	<i>Institut Pierre Simon Laplace</i>
MIROC5	<i>University of Tokyo, National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology</i>

### 3.3. Modelo para cálculo de R-UV

Para calcular os níveis de exposição à R-UV na superfície da Terra foi utilizado o modelo de transferência radiativa *Tropospheric Ultraviolet-Visible Model* (TUV) versão 4.4. O TUV foi desenvolvido por S. Madronich e colaboradores no National Center for Atmospheric Research (NCAR) em 1987. A descrição e o código do modelo estão disponíveis no sítio <http://www.acd.ucar.edu/TUV>.

As projeções de concentrações de ozônio para cada localidade da área de estudo são utilizadas para estimar a R-UV que atinge a superfície e sua efetividade biológica (IUV, dose eritematosa e síntese de vitamina D). Neste trabalho, algumas considerações foram estabelecidas para os cálculos. São elas: a) condição de céu claro; b) conteúdos de aerossóis padronizados (*background*) para todas as localidades; c) refletância do solo para ambientes urbanos (3 a 5%); e, d) cálculos realizados pelo método de ordenadas discretas (*4-streams*). Essa padronização permite estabelecer uma comparação cuja finalidade é unicamente estudar a influência da variabilidade do ozônio.

O IUV foi calculado, ano a ano, para a série temporal de 2006 a 2100, e estimado para os dias de solstícios (21 de junho e dezembro) e equinócios (21 de março e setembro) de cada ano da série. Estas estimativas foram feitas para a passagem meridiana do Sol, isto é, o meio-dia solar, de modo a estabelecer a irradiância máxima para uma condição de céu claro. Nesta primeira etapa, a avaliação do IUV visa exclusivamente estudar o impacto das variações do conteúdo de ozônio sobre os fluxos máximos diários de R-UV ponderados em relação aos impactos na saúde humana.

Numa segunda etapa foram calculadas as doses ponderadas eritematosas (E-RUV) e de síntese de pré-vitamina D (D-RUV). A D-RUV corresponde à efetividade da R-UV para os seres humanos produzirem o precursor de vitamina D (7-dehidrocolesterol). A E-RUV retrata a eficiência da R-UV em induzir eritema na pele humana. Neste caso, avaliou-se o impacto das variações do ozônio sobre o total acumulado de R-UV durante o dia. Este tipo de análise permite inferir o impacto que tais variações possam implicar sobre a saúde humana, uma vez que os efeitos à saúde são cumulativos. Para tanto, as doses foram calculadas para cinco períodos: 2015, 2025, 2050, 2075 e 2100. Os cálculos foram feitos em intervalos de dez minutos das 8h às 22h (GMT). Posteriormente, as doses foram integradas para calcular a dose total acumulada ao longo do dia.

## **4. Resultados**

### **4.1. Séries temporais de ozônio**

A análise de dados históricos é importante para caracterizar o comportamento futuro do conteúdo de ozônio, pois entender seu ciclo natural e sua variabilidade intrínseca é fundamental para se avaliar as possíveis tendências e mudanças futuras, e também ponderar a influência antrópica.

Os valores da coluna total de ozônio foram obtidos no sítio eletrônico da *National Aeronautics and Space Administration* – NASA (<http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/>). Esses dados são resultados das medições de sensores a bordo dos satélites NIMBUS 7, METEOR 3, *Total Ozone Mapp Spectrometer* (TOMS) e *Ozone Monitoring Instrument* (OMI). Cada satélite

disponibiliza dados da coluna total de ozônio para um determinado período: Nimbus 7 (1978-1993); Meteor 3 (1991-1991); TOMS (1996-2005); OMI (2004-2013).

De acordo com Douglass e colaboradores (2011), a média anual do CTO se manteve praticamente constante nas regiões de médias latitudes do Hemisfério Sul (35°S-60°S) durante os períodos de 1996-2005 e 2006-2009. Durante estes períodos, a média anual de CTO foi aproximadamente 6% menor do que a média do período de 1964-1980. Nas regiões de médias e altas latitudes no Hemisfério Sul foi observada diminuição do CTO, agravada em períodos de aumento da concentração de substâncias destruidoras da camada de ozônio.

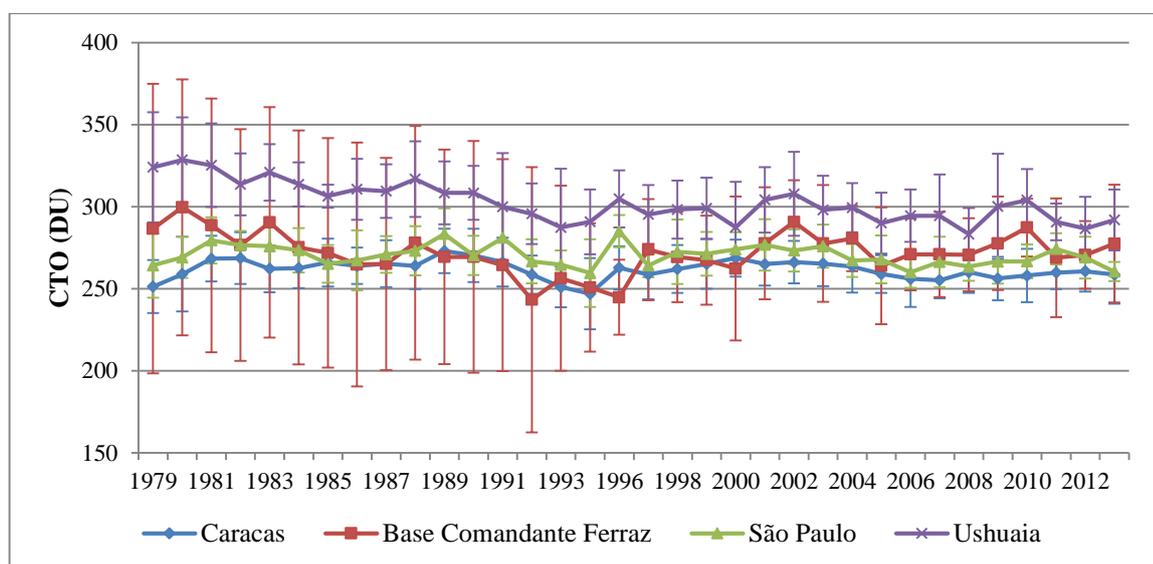


Figura 7 - Médias anuais de CTO em Caracas, Ushuaia e Base Comandante Ferraz - série histórica de 1978 a 2013. As barras verticais indicam o desvio padrão ( $\alpha$ : 0.05).

Em concordância com os autores supracitados, a figura 7 ilustra o comportamento do CTO descrito. Pode-se observar que na cidade de Ushuaia e na Base comandante Ferraz, localidades de maiores latitudes, houve diminuição na média anual de ozônio. Nas regiões tropicais, por exemplo, na cidade de Caracas, a diminuição da média anual de CTO não foi significativa. É importante ressaltar o comportamento latitudinal do CTO. As regiões de maiores latitudes sofrem maior impacto no CTO em períodos de maior concentração de substâncias destruidoras de ozônio quando comparadas às regiões de menores latitudes, onde a repercussão é mais amena.

As médias mensais de CTO no período de 1978 – 1990 eram superiores aos períodos posteriores, e a amplitude de variação intra-anual também era maior. Observa-se a tendência de diminuição da amplitude de variação do CTO ao longo dos anos, principalmente nas regiões de médias e altas latitudes. Em Ushuaia e na Base Comandante Ferraz, principalmente nesta

última, a variação anual média entre períodos de buraco da camada de ozônio o CTO chegou a superar 200 DU em vários anos no período de 1978-1990.

## 4.2. Modelos e Cenários (RCP)

Primeiramente, foi realizada uma análise comparativa entre os dados de ozônio fornecidos pelos diferentes modelos do CMIP5. Comparando as médias do CTO dos modelos, conclui-se que existe diferença entre todos os modelos ( $F(3,60156) < 186,669$ ;  $\alpha = 0.05$ ;  $p < 0,001$ ). Analisando as diferenças médias entre os modelos observa-se que o modelo CSIRO apresenta os maiores valores de CTO geral, enquanto o CCSM4 apresenta os menores valores médios. A figura 8 ilustra a distribuição dos dados de CTO de todas as localidades para cada modelo e pode-se observar as tendências dos modelos.

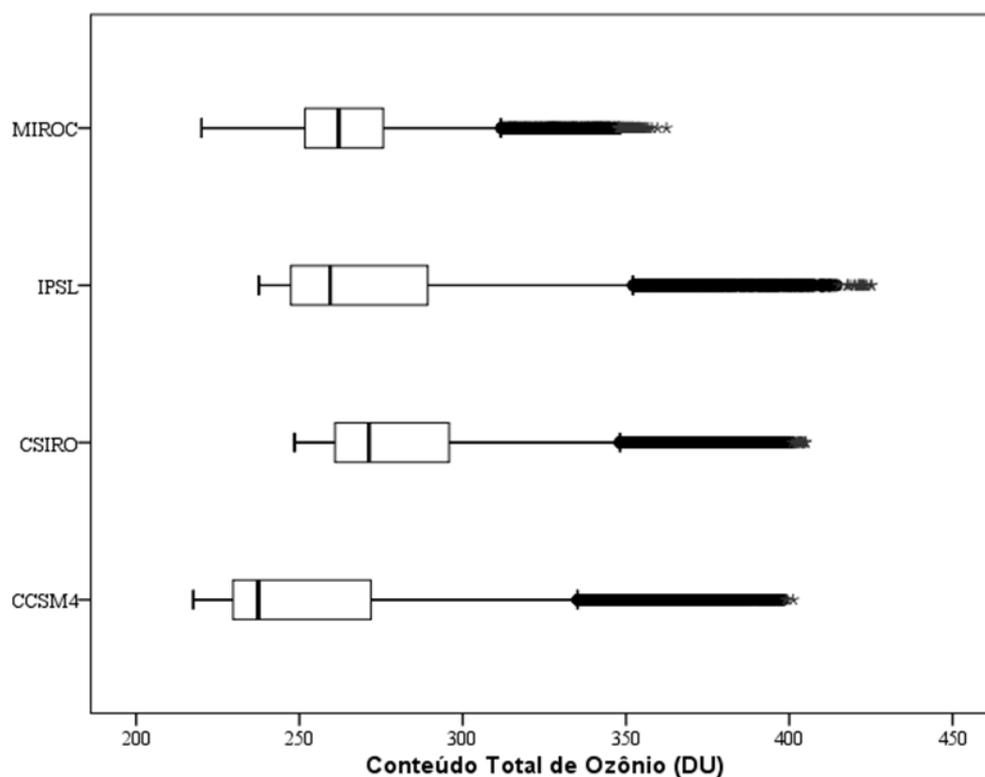


Figura 8 - Gráfico *boxplot* representando os dados de CTO de todas as localidades estudadas para cada modelo climático.

Para comparar as similaridades entre os modelos foi feita uma análise de agrupamentos, e a distância entre os grupos está ilustrada no dendograma da figura 9. Considerando cada modelo como um grupo individual, obtêm-se, em primeira instância, quatro grupos. Após a primeira aglomeração, observa-se a formação de três grupos. Um novo grupo foi formado a partir da aglomeração dos modelos mais próximos, o CSIRO e o IPSL. O passo

seguinte resultou em dois grupos. Um grupo foi resultado da aglomeração de modelo MIROC ao grupo CSIRO e IPSL. O outro grupo contém apenas o modelo CCSM4, ilustrando que este é o modelo mais distante dos outros três modelos.

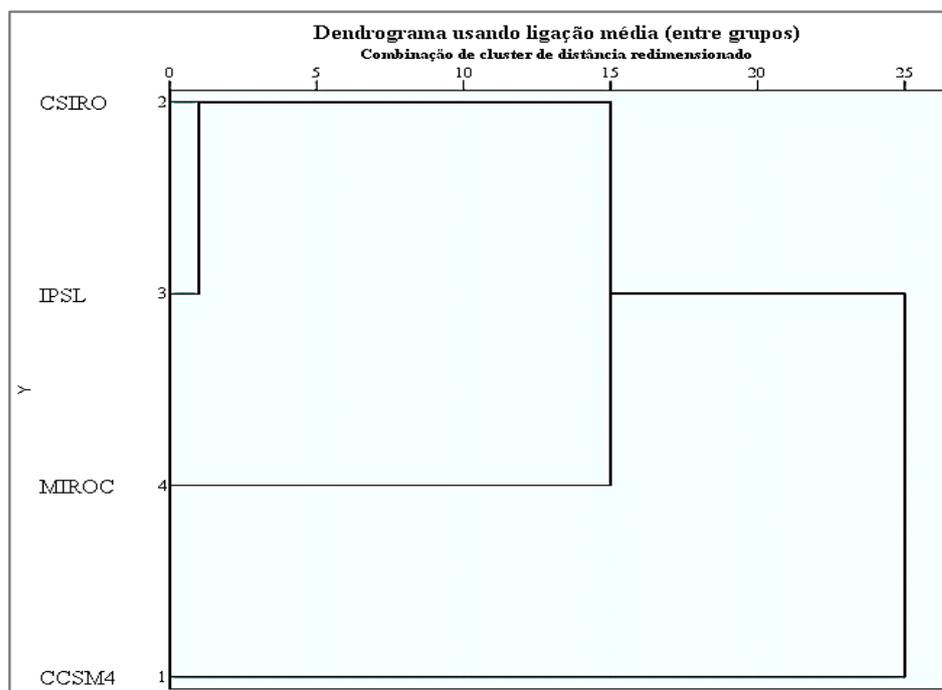


Figura 9 - Dendrograma de ligação entre os quatro modelos utilizados. A disposição no eixo vertical é em ordem decrescente de semelhança, o eixo horizontal indica as distâncias entre grupos formados.

A proximidade entre os modelos foi quantificada por meio do coeficiente de similaridade (tabela 6). Devido a similaridade entre os modelos CSIRO e IPSL, caso seja pertinente diminuir a quantidade de dados, pode-se utilizar para a análise da variável em questão apenas um dos modelos. Em relação aos modelos com menor similaridade entre si, sugere-se investigar mais profundamente quais fatores influenciam tais diferenças.

Tabela 6 – Coeficiente de similaridade entre os quatro modelos climático.

	CCSM	CSIRO	IPSL	MIROC
CCSMA	100.0%	0.0%	44.7%	30.5%
CSIRO	0.0%	100.0%	100.0%	53.7%
IPSL	44.7%	100.0%	100.0%	58.4%
MIROC	30.5%	53.7%	58.4%	100.0%

Para investigar a tendência sazonal do CTO sob a perspectiva de cada modelo, foi realizada uma análise estatística descritiva dos dados de ozônio para cada localidade nas diferentes estações do ano. A figura abaixo (figura 10) ilustra a distribuição do CTO dos diferentes modelos em cada estação. As quatro localidades selecionadas exemplificam o comportamento do ozônio em baixas, médias e altas latitudes.

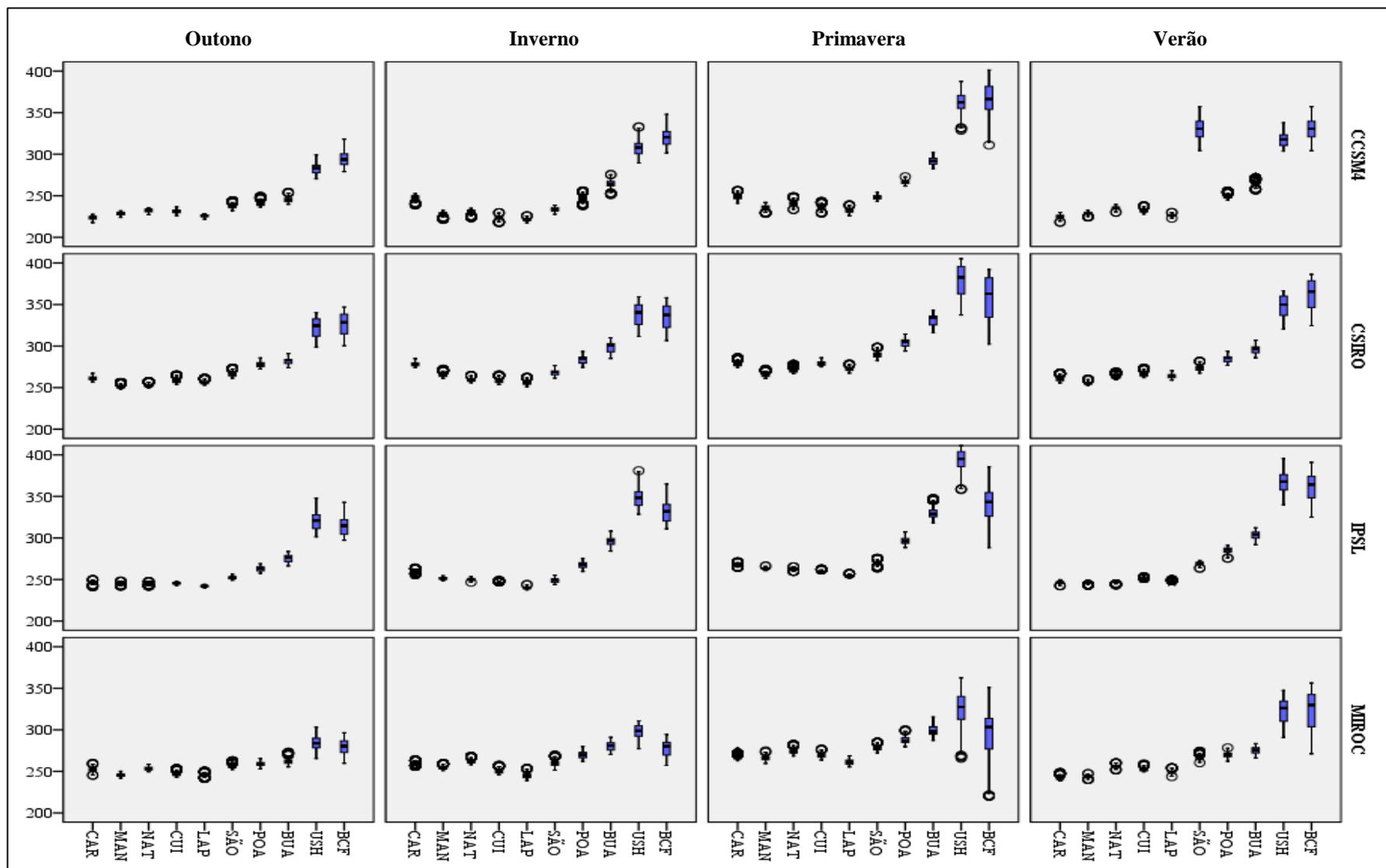


Figura 10 – Gráficos de *box plot* dos dados de CTO (DU) dos quatro modelos climáticos (linhas) em todas as estações (colunas) para todas as localidades estudadas. Os círculos indicam os valores extremos.

Observa-se o gradiente de concentração latitudinal do ozônio com registros de menores médias de concentrações em regiões de menor latitude. Os modelos IPSL e MIROC apresentam valores de CTO intermediários aos modelos CCSM4 e CSIRO. O modelo CSIRO apresenta os maiores valores de CTO e de desvio padrão na maior parte dos casos estudados.

A os maiores valores de dados de CTO são provenientes do modelo CSIRO, bem como a maior dispersão dos dados pelo modelo MIROC. As regiões de maiores latitudes, Ushuaia e Base Comandante Ferraz, apresentam maior dispersão de dados. O CTO nesta estação apresenta maior variação em tais localidades devido ao comportamento natural de formação/destruição da camada de ozônio.

Além dos modelos, também foram analisados os quatro diferentes cenários climáticos. Evidenciou-se que há diferenças entre os cenários ( $F(3,60156) < 35,313$ ;  $\alpha = 0.05$ ). Um teste *post hoc* de Tukey mostrou que apenas o RCP 8.5 difere significativamente dos outros RCP, enquanto que as médias dos RCP 2.6, RCP 4.5 e RCP 6.0 não apresentam diferenças significativas no nível de 0.05. Dessa forma, pode-se sugerir utilizar apenas um dentre os três RCP para análises posteriores, e dessa maneira diminuir a quantidade de dados a serem analisados. O mesmo teste foi realizado para cada estação, e o mesmo resultado foi encontrado.

### **4.3. Evolução temporal do Conteúdo Total de Ozônio**

Nesta seção são apresentadas as projeções da evolução temporal do CTO ao longo deste século para os quatro cenários climáticos. Os dados que compreendem a série de 2006 a 2100 foram divididos em dois períodos de tempo. O período T1 é referente às projeções de 2006 -2050 e T2 que abrange a série de 2051-2100. As projeções foram comparadas às séries de dados coletados por satélites (OMI, TOMS, Meteor e Nimbus7). Os dados provenientes de satélites foram denominados como dados históricos e compreendem uma série de 30 anos (1976-2005) de dados de CTO. As diferenças entre os dados provenientes de satélites e os dados atuais dos modelos climáticos não diferem significativamente, portanto, utilizou-se os dados de satélite, os quais compreendem a série de 2002-2012 e são denominados como dados atuais.

A comparação entre os dados atuais e as projeções foi feita para cada estação do ano utilizando a média da diferença. Em todas as estações do ano, nos dois períodos T1 e T2, observa-se que nessas regiões os níveis de CTO tendem a aumentar ao longo dos anos. A

notoriedade desses resultados está na influência da reconstituição da camada de ozônio na Antártica.

Verifica-se a tendência de aumento do CTO em todas as localidades ao longo do século em todos os cenários climáticos em todas as estações. A figura 11 ilustra a variação de CTO ao longo do século no período da primavera. A variação do CTO ao longo do século XXI é menor nas regiões de menores latitudes, para todos os cenários climáticos. O incremento de ozônio é mais proeminente a partir da segunda metade do século e nas regiões de maiores latitudes. Verifica-se que em todas as estações do ano ao longo do século que o aumento de ozônio é maior para o cenário de maior forçante radiativa (RCP 8.5) em todas as regiões estudadas.

Existem diferenças entre os RCP quanto ao CTO. No entanto, deve-se lembrar que apenas o RCP 8.5 difere significativamente dos demais cenários na maioria das localidades e estações (teste *post hoc* de Tukey, diferença média significativa no nível de 0.05). As médias de CTO para cada localidade e estação, quase em sua totalidade, não apresentam diferença significativa entre os RCP 2.6; 4.5 e 6.0. Portanto, foram representados, para maioria dos resultados apenas os dados dos dois cenários extremos RCP 2.6 e 8.5.

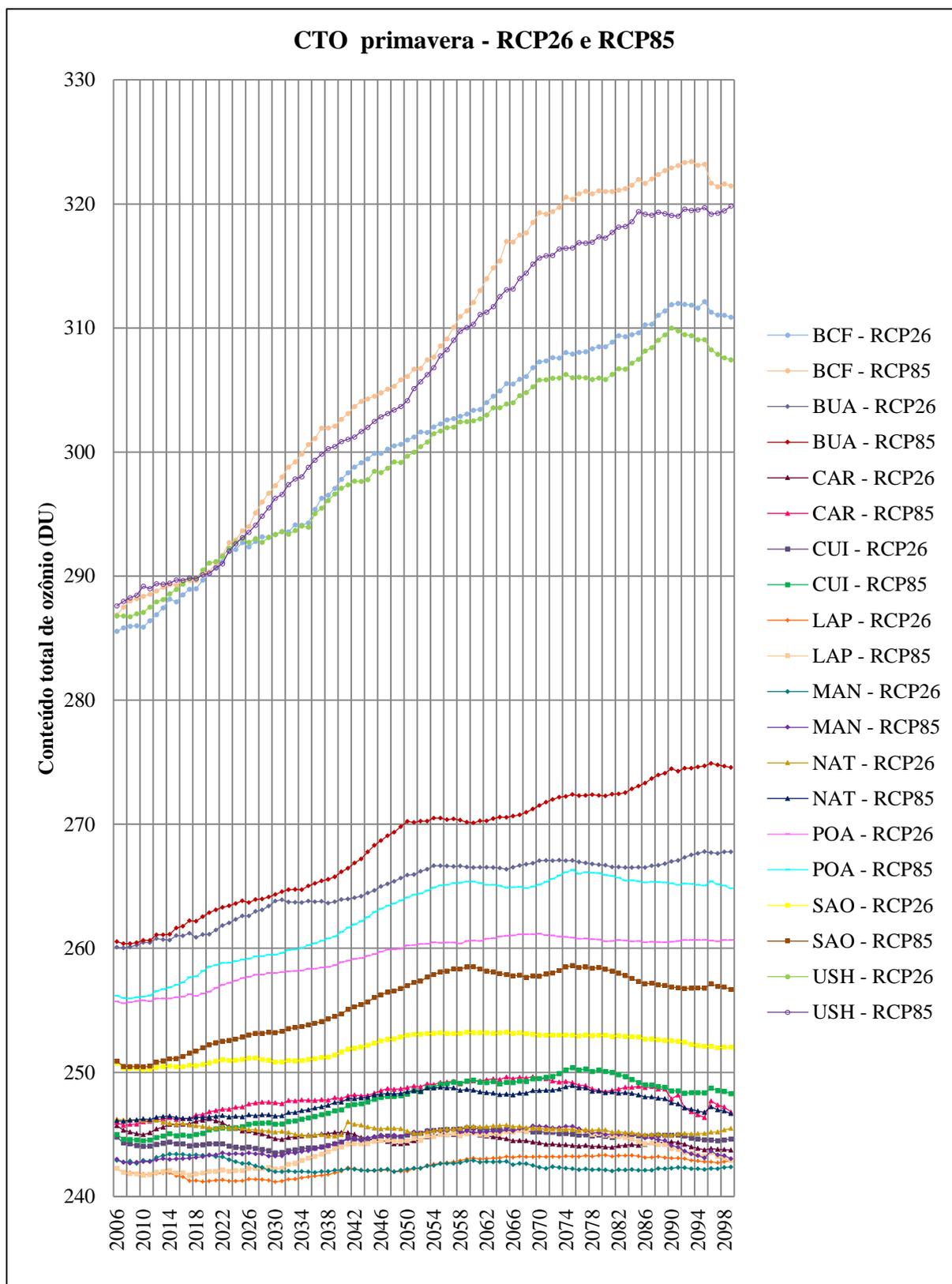


Figura 11 - Projeções do CTO para todas as localidades na estação da primavera - RCP 26 E RCP85.

Nas regiões compreendidas entre as latitudes 10° N e 17°S, a variação do CTO ao longo do século é menor quando comparadas às regiões de altas latitudes. Na primeira metade do século o CTO é similar para todos os RCP em todas as estações do ano. A tabela 7 abaixo apresenta a média da diferença relativa (%) de CTO entre os dados atuais o período T1 e. As principais diferenças relativas de CTO são observadas no período de inverno e primavera, e as menores diferenças são observadas na estação de outono.

Em todas as estações constatam-se aumentos maiores de CTO nas regiões de altas latitudes, contudo esse aumento não foi significativo para alguns cenários em algumas estações. Em Ushuaia o aumento não foi significativo ( $\alpha:0.05$ ) no inverno e no outono para os RCP 26 (p-valor respectivo da estação de inverno e outono: 0.105; 0.085) e 45 (p-valor respectivo da estação de inverno e outono: 0.117; 0.065). Na Base Comandante Ferraz o aumento não foi significativo apenas no outono para os dois cenários de menores emissões (p-valor: 0.156; 0.086).

Na estação do verão observa-se aumento da diferença em regiões de latitudes menores, próximas à latitude 20°S. Diferença mínima relativa superior a 12% em São Paulo e superior a 1.8% em Buenos Aires, contudo esse resultado não é significativo para Buenos Aires na primeira metade do século para os três cenários de menores emissões (p-valor: 0.112; 0.183; 0.318 – respectivamente RCP 26; 45 e 60).

Nas regiões acima de 20°S, o CTO, bem como a média das diferenças não apresentam variação significativa entre as estações do ano e a maioria dos RCP. Apenas a cidade de Caracas apresenta diferenças entre as estações do ano. Em Caracas, a diferença relativa é menor nos períodos de primavera e verão, e maior nos períodos de outono e inverno. Esse comportamento observado em Caracas, antagônico quando comparada às outras localidades, se deve ao fato de estar localizada acima da linha do Equador, e, portanto, as estações são contrárias às do hemisfério sul. Portanto, para comparar Caracas corretamente com as outras localidades de estudo as estações serão invertidas nas análises.

Tabela 7 – Diferença relativa das médias do CTO referente a cada estação do ano entre os dados atuais e o período T1. Os valores entre parênteses representam o desvio padrão relacionado às variações entre os modelos.

<b>Estação</b>	<b>Localidade</b>	<b>RCP 2.6</b>	<b>RCP 4.5</b>	<b>RCP 6.0</b>	<b>RCP 8.5</b>
Outono	Caracas	15.5 (16.4)	15.2 (16.9)	15.8 (17.2)	14.2 (16.6)
	Manaus	13.5 (12.6)	13.7 (12.6)	14.5 (13.2)	13.2 (12.7)
	Natal	15.3 (12.1)	15.4 (12.2)	16.3 (12.7)	14.8 (12.3)
	Cuiabá	9.9 (12.4)	9 (12.2)	10.5 (12.6)	8.8 (12.1)
	La Paz	9.4 (15.8)	8.7 (15.8)	9.8 (16.1)	8.8 (15.9)
	São Paulo	6.7 (13)	5.7 (12.9)	7.7 (13.3)	5.5 (13.2)
	Porto Alegre	7.2 (15.2)	6.2 (14.9)	8.1 (15.4)	6 (15.2)
	Buenos Aires	8.9 (15.1)	7.6 (14.3)	9.5 (15.3)	8.1 (15)
	Ushuaia	-3.6 (21.7)	-3.9 (21.9)	-5.3 (20.5)	-4.7 (21.3)
	Base Comandante Ferraz	-3.1 (21.8)	-3.8 (22)	-4.5 (20.8)	-4.6 (21.3)
Inverno	Caracas	13.9 (20.2)	14.1 (20.2)	14.2 (20.3)	13.1 (20.1)
	Manaus	13.7 (22.2)	12.9 (22.2)	14.3 (22.6)	13 (22.4)
	Natal	15.3 (22.6)	15 (22.6)	16.2 (23)	15.2 (22.8)
	Cuiabá	13.1 (20.3)	13 (20.1)	13.7 (20.5)	12.4 (20.3)
	La Paz	14.3 (21.2)	14.4 (21)	15.1 (21.4)	13.8 (21.3)
	São Paulo	16.8 (22.3)	16.5 (22.3)	16.8 (22.4)	16.1 (22.3)
	Porto Alegre	20.9 (23.9)	20.4 (24.2)	21.4 (24.6)	20.3 (24.2)
	Buenos Aires	16.9 (25.2)	16.8 (25.3)	18.5 (26)	15.9 (25)
	Ushuaia	-5.2 (33.4)	-5.1 (33.8)	-4.7 (33.9)	-7.5 (32.9)
	Base Comandante Ferraz	-73.7 (90.9)	-74 (90.7)	-74 (90.9)	-76.3 (90.7)
Primavera	Caracas	1.6 (15.3)	1.3 (15.6)	1.5 (15.9)	0.6 (15.3)
	Manaus	13.5 (15.2)	12.5 (15.9)	13.4 (16.1)	11.9 (15.2)
	Natal	14.1 (15.2)	13.3 (15.8)	14.1 (16.1)	12.6 (15.3)
	Cuiabá	14 (17.7)	13.8 (17.7)	13.3 (18.3)	12.5 (17.3)
	La Paz	17.6 (19.7)	16.9 (19.7)	15.7 (19.9)	15.6 (19.2)
	São Paulo	14.6 (17.8)	14.2 (18)	14.4 (17.8)	13.4 (17.7)
	Porto Alegre	12.5 (19.7)	12.3 (20)	12.1 (19.9)	11.3 (19.9)
	Buenos Aires	4.3 (23.4)	4.3 (23.8)	3.5 (23.1)	2.9 (23.2)
	Ushuaia	-28.3 (47.2)	-30.6 (46)	-30.5 (44.2)	-33.1 (44.1)
	Base Comandante Ferraz	-43.5 (62.1)	-45.5 (61.7)	-45 (60.1)	-49.7 (58.5)
Verão	Caracas	4.4 (13.9)	4.3 (13.9)	4.9 (14.3)	3.6 (13.8)
	Manaus	12.2 (13.4)	12 (13.4)	12.2 (13.6)	11.7 (13.4)
	Natal	12.1 (12.4)	12 (12.4)	12.2 (12.7)	11.1 (12.6)
	Cuiabá	13.9 (14.9)	13.4 (15)	14 (15.2)	12.9 (14.9)
	La Paz	14.3 (19.1)	13.7 (18.9)	14 (19.1)	13.5 (18.9)
	São Paulo	-12.5 (23.7)	-13.9 (24.6)	-12.4 (23.6)	-13.5 (24.1)
	Porto Alegre	2.6 (15.6)	2.5 (15.4)	3.3 (16)	1.4 (15.1)
	Buenos Aires	-2.7 (17.6)	-2.3 (17.5)	-1.8 (18.3)	-4 (17.3)
	Ushuaia	-19.9 (28.5)	-20.3 (28.1)	-19.3 (28.6)	-20.7 (28.4)
	Base Comandante Ferraz	-16.6 (29.4)	-17.8 (28.6)	-16.7 (29.8)	-18.1 (29.5)

A partir da segunda metade do século observa-se aumento no incremento de CTO nas regiões de altas e médias latitudes em quase todas as estações do ano. Nas regiões de altas latitudes, Ushuaia e Base comandante Ferraz, as médias das diferenças de CTO em todas as estações do ano são maiores quando comparadas aos dados da primeira metade do século. As diferenças das médias relativas entre os RCP aumentam nas regiões de alta latitude, a diferença pode superar 10 DU entre os RCP extremos (2.6 e 8.5) em todas as estações nas duas regiões de maiores latitudes.

Nas regiões de São Paulo, Buenos Aires e Porto Alegre - médias latitudes - a diferença entre as médias (dados atuais e T2) para o RCP 85 não foi significativa ( $\alpha$ : 0.05) no período de outono (respectivos p-valor: 0.616; 0.819; 0.399). Em Porto Alegre as diferenças entre as médias também não foram significativas nas estações da primavera (RCP 85; p-valor: 0.366) e verão (RCP 26, 45 e 60; respectivos p-valor: 0.230; 0.120; 0.318).

Na segunda metade do século testemunham-se maiores diferenças no CTO quando comparados os diferentes cenários. De maneira geral, o aumento do CTO é maior nos cenários de maior poluição. O aumento do CTO e os impactos na saúde humana são discutidos nos itens subsequentes.

Tabela 8 – Diferença relativa das médias do CTO referente a cada estação do ano entre os dados atuais e o período T2. Os valores entre parênteses representam o desvio padrão relacionado às variações entre os modelos.

<b>Estação</b>	<b>Localidade</b>	<b>RCP 2.6</b>	<b>RCP 4.5</b>	<b>RCP 6.0</b>	<b>RCP 8.5</b>
Outono	Caracas	16.3 (17)	14.5 (18.3)	15.8 (18.8)	11.6 (18.3)
	Manaus	13.9 (13)	13.5 (13.5)	14.8 (13.9)	11 (13.6)
	Natal	15.8 (12.2)	14.9 (12.8)	16.7 (13.2)	12.7 (13.2)
	Cuiabá	8.7 (12.9)	8.1 (13.2)	9.5 (13.7)	4.7 (13.4)
	La Paz	7.9 (16.1)	8 (16.6)	9.2 (16.7)	5.8 (16.7)
	São Paulo	4.3 (13.7)	3.4 (13.9)	5.4 (14.1)	-0.7 (13.6)
	Porto Alegre	3.2 (16.4)	2.1 (16.7)	3.7 (16.6)	-1.3 (15.9)
	Buenos Aires	3.9 (17.1)	1.7 (16.7)	3.3 (17.1)	-0.4 (17.1)
	Ushuaia	-16.9 (25.6)	-19.2 (25.6)	-20.4 (25.9)	-25.4 (25.5)
	Base Comandante Ferraz	-18.3 (24.8)	-21.7 (24.7)	-23.4 (24.1)	-27.9 (25)
Inverno	Caracas	13.5 (20.9)	13.6 (21.4)	14.2 (21.4)	9.8 (21.2)
	Manaus	12.9 (22.4)	11.7 (23)	13.3 (23.5)	9.1 (22.9)
	Natal	14.2 (22.9)	13.2 (23.3)	15.3 (24)	10.6 (23.5)
	Cuiabá	11.6 (20.8)	10.7 (21.2)	11.7 (21.7)	7.1 (21.1)
	La Paz	12.3 (21.6)	11.5 (22)	12.1 (22.6)	8.7 (22.2)
	São Paulo	12.7 (22.6)	11.9 (23.1)	13.5 (23.7)	8.8 (23.2)
	Porto Alegre	14.9 (25)	13.8 (25)	14.4 (25.5)	10.2 (25.1)
	Buenos Aires	9.3 (26.8)	8.4 (26.7)	7.1 (26.5)	3.7 (26.3)
	Ushuaia	-19.6 (35.7)	-22 (36.9)	-24.8 (36)	-29.7 (36.4)
	Base Comandante Ferraz	-92.3 (91.5)	-94.5 (92.1)	-97.1 (91.9)	-101.7 (91.2)
Primavera	Caracas	1.4 (16.4)	0.1 (16.4)	1.1 (16.8)	-3.9 (15.9)
	Manaus	12.9 (16.1)	11.7 (16.9)	12.4 (17.3)	8.2 (16.2)
	Natal	13.4 (16.2)	12 (16.9)	13.1 (17.2)	8.4 (16.2)
	Cuiabá	13.6 (19.2)	13 (18.9)	11.5 (19.6)	8.2 (18.7)
	La Paz	16.4 (20.8)	15.6 (20.6)	14 (20.8)	12.3 (20.3)
	São Paulo	13.2 (19.1)	11.3 (18.9)	11.6 (19.8)	7 (19.2)
	Porto Alegre	8.7 (21.2)	6.2 (21)	6.3 (22)	1.8 (21.5)
	Buenos Aires	-2 (25.8)	-5.5 (25.1)	-6.5 (25.2)	-10.7 (25)
	Ushuaia	-55.8 (41.4)	-62.5 (39.2)	-63.5 (40.5)	-67.2 (42)
	Base Comandante Ferraz	-86.9 (53.1)	-92.6 (52.7)	-92.2 (52.6)	-95.9 (54.8)
Verão	Caracas	4.1 (14.8)	3.4 (15)	3.7 (15.3)	-0.2 (15)
	Manaus	11.7 (14)	11.3 (14.1)	12.4 (14.6)	9.5 (14.2)
	Natal	11.3 (13.2)	11.1 (13.2)	13 (13.8)	8.6 (13.8)
	Cuiabá	12.9 (16)	12.1 (16.3)	13.2 (16.3)	9.1 (16)
	La Paz	12 (19.9)	12.2 (20.1)	12.3 (20.2)	9.6 (20)
	São Paulo	-19.2 (28.4)	-20.8 (29.6)	-20.3 (31)	-26 (33.1)
	Porto Alegre	-2 (17.5)	-2.6 (17.5)	-1.7 (17.7)	-6.3 (16.9)
	Buenos Aires	-8.8 (19.5)	-9.6 (19.2)	-8.9 (20.2)	-13.5 (19.3)
	Ushuaia	-40.7 (27.6)	-41.4 (29.5)	-43.2 (29.3)	-47.1 (29.7)
	Base Comandante Ferraz	-47.8 (27.2)	-49.4 (28)	-52.5 (26.9)	-57.5 (26.3)

#### 4.4. Mudanças no IUV devido às mudanças do ozônio

O aumento do CTO ao longo do século, consenso entre todos os modelos climáticos e cenários (RCP), influencia a quantidade de R-UV em superfície. Quanto maior a quantidade de ozônio estratosférico, menor é a quantidade de R-UV que atinge a superfície do planeta. Para avaliar o impacto dessa redução na saúde humana ao longo do século, neste item, discute-se o comportamento do IUV ao longo do século em resposta ao aumento do CTO. Por essa razão, todos os cálculos foram realizados para dias de céu claro, sem nuvens, e com conteúdos constantes de aerossóis atmosféricos.

Para cada localidade e estação do ano foi calculado o IUV para três períodos deste século: 2006, 2050 e 2100. Para cada período foi estimado o IUV para cada cenário climático (RCP).

Em grande parte da América do Sul observam-se altos valores de IUV ao longo de todo ano, em todas as estações do ano. Os valores calculados de IUV para os RCP extremos (2.6 e 8.5) na estação de verão estão ilustrados na figura 12. Em todas as localidades observam-se menores IUV para o RCP 8.5 quando comparado ao RCP 2.6.

Na primavera e no verão são observadas as maiores diferenças entre as médias de IUV quando comparados os três intervalos de tempo. Os valores de IUV decrescem ao longo do século, contudo essa diminuição não é significativa em todas as localidades ( $\alpha=0.05$ ). No verão as diferenças ao longo do século no IUV não são significativas nas cidades de Manaus, Natal e Cuiabá. Em La Paz e Caracas observa-se diferença significativa apenas entre a primeira metade do século. Nas regiões de altas latitudes as diferenças são significativas ao longo de todo o século.

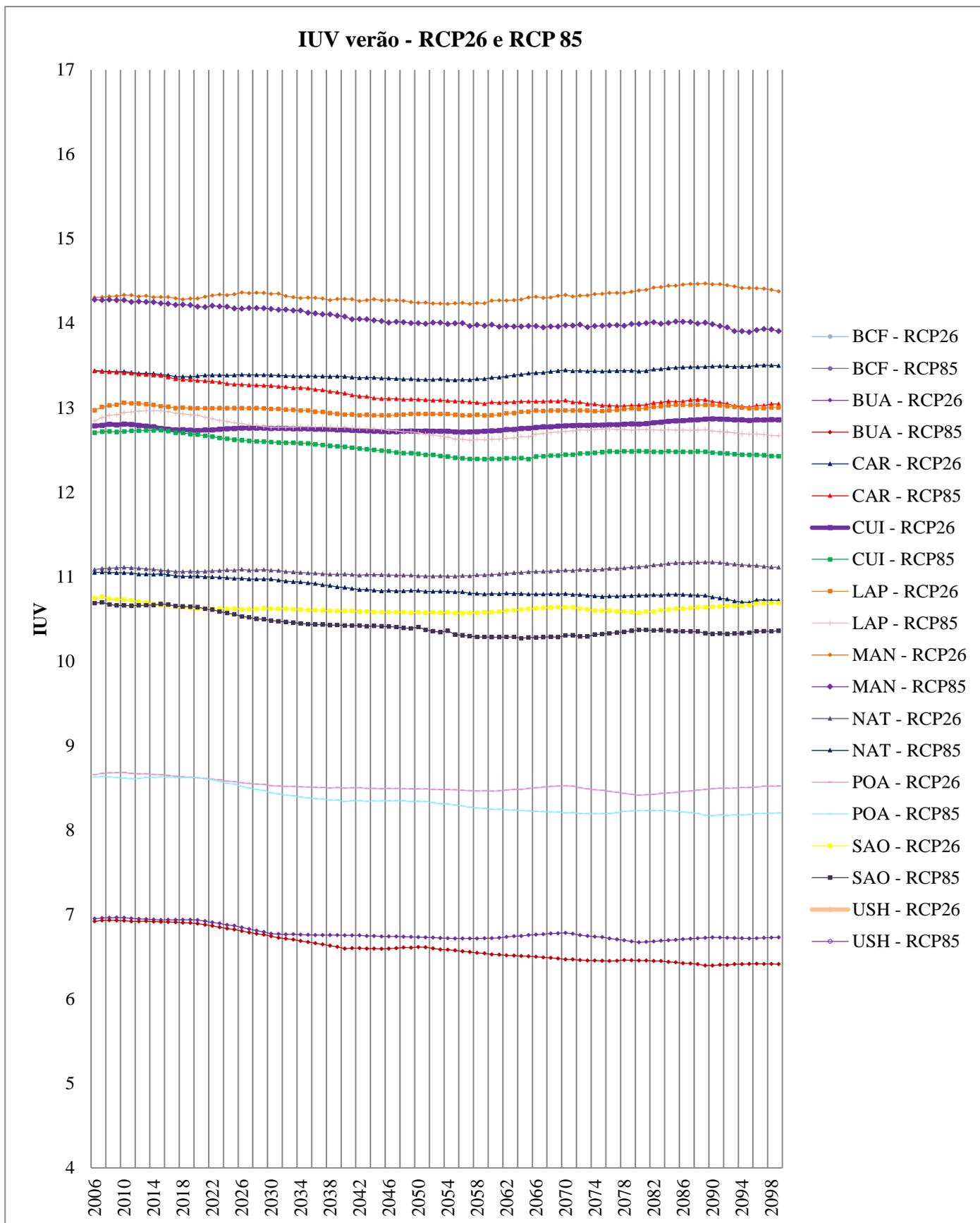


Figura 12 - Projeções de IUV para todas as localidades no período de verão – RCP26 e RCP85.

No período de outono, ao longo de todo século, os valores de IUV estimados são classificados como extremos ( $IUV > 10$ ) nas regiões compreendidas entre as latitudes  $10^{\circ}N$  e  $23^{\circ}S$ . As cidades de Buenos Aires e Porto Alegre possuem estimativas de IUV consideradas altas de acordo com a OMS.

Ainda para o período de outono, observam-se nas regiões de altas latitudes baixos valores de IUV na Base Comandante Ferraz, e valores moderados em Ushuaia. Ressalta-se que para valores moderados de IUV são necessárias algumas precauções quanto ao comportamento de exposição à R-UV, enquanto que para IUV baixo são desnecessárias.

Na estação de inverno (tabela 9), períodos do ano em que são esperados os menores valores de IUV, observam-se valores extremos de IUV nas localidades próximas ao Equador (Caracas e Manaus). Valores altos de IUV são previstos para Natal, Cuiabá e La Paz.

Em São Paulo, Porto Alegre e Buenos Aires são estimados valores moderados de IUV. É importante ressaltar que mesmo no período de inverno, nessas localidades, há necessidade de proteção. Em Ushuaia e na Base Comandante Ferraz os valores de IUV são baixos. Na Base Comandante Ferraz, a partir da metade do século o IUV diminui significativamente quando comparado a 2006, mas não há diferenças entre os cenários climáticos.

Tabela 9 – IUV no período de inverno calculado para todas as localidades em três momentos: 2006, 2050 e 2100. Os valores entre parênteses representam o desvio padrão relacionado às variações entre os modelos.

	2006		2050		2100	
	RCP26	RCP85	RCP26	RCP85	RCP26	RCP85
CAR	13.2(0.6)	13.2(0.6)	13.1(0.7)	13(0.8)	13.2(0.7)	13.2(0.9)
MAN	11.2(0.8)	11.2(0.8)	11.2(0.8)	11.1(0.9)	11.3(0.8)	11.1(1)
NAT	10.5(0.7)	10.5(0.7)	10.4(0.7)	10.3(0.7)	10.5(0.7)	10.3(0.9)
CUI	8(0.5)	8.1(0.6)	8(0.6)	7.9(0.6)	8(0.6)	7.9(0.7)
LAP	8(0.5)	8(0.5)	7.9(0.5)	7.8(0.6)	7.9(0.6)	7.7(0.7)
SÃO	5.6(0.4)	5.6(0.4)	5.5(0.4)	5.4(0.4)	5.5(0.4)	5.4(0.5)
POA	3.8(0.2)	3.7(0.2)	3.7(0.2)	3.6(0.3)	3.7(0.3)	3.5(0.3)
BUA	2.6(0.2)	2.6(0.2)	2.6(0.2)	2.5(0.2)	2.5(0.2)	2.4(0.2)
USH	0.4(0.3)	0.4(0.3)	0.4(0.3)	0.4(0.3)	0.4(0.3)	0.5(0.3)
BCF	1.8(0.2)	1.8(0.2)	0.1(0)	0.1(0)	0.1(0)	0.1(0)

A tendência dos valores de IUV da estação de primavera (tabela 10) são pouco maiores aos estimados para o outono. Nessa estação, nas regiões de médias latitudes, o IUV varia de alto a moderado. Em La Paz, Manaus e Caracas são observados os valores de IUV mais extremos, configurando alto risco à população.

Tabela 10 - IUV no período de primavera calculado para todas as localidades em três momentos: 2006, 2050 e 2100. Os valores entre parênteses representam o desvio padrão relacionado às variações entre os modelos.

	2006		2050		2100	
	RCP26	RCP85	RCP26	RCP85	RCP26	RCP85
CAR	13.4(0.7)	13.4(0.7)	13.3(0.7)	13.1(0.7)	13.5(0.8)	13(0.7)
MAN	14.3(1)	14.3(0.9)	14.2(1)	14(1)	14.4(1)	13.9(1)
NAT	11.1(0.8)	11(0.7)	11(0.8)	10.8(0.7)	11.1(0.8)	10.7(0.8)
CUI	12.8(1.1)	12.7(1)	12.7(1.2)	12.5(1)	12.9(1.3)	12.4(1.2)
LAP	13(1.1)	12.8(0.9)	12.9(1.1)	12.7(1)	13(1.2)	12.7(1.2)
SÃO	10.7(0.8)	10.7(0.8)	10.6(0.9)	10.4(0.8)	10.7(0.9)	10.4(0.9)
POA	8.7(0.5)	8.6(0.5)	8.5(0.6)	8.3(0.6)	8.5(0.6)	8.2(0.7)
BUA	6.9(0.4)	6.9(0.4)	6.7(0.5)	6.6(0.5)	6.7(0.6)	6.4(0.5)
USH	2.6(0.4)	2.5(0.4)	2.2(0.2)	2.2(0.2)	2.2(0.2)	2.1(0.2)
BCF	2(0.4)	1.9(0.4)	1.6(0.1)	1.5(0.1)	1.5(0.2)	1.4(0.2)

No período da primavera observa-se a tendência de diminuição do IUV ao longo do século a partir da latitude 20°S. Apenas nas regiões de altas latitudes, mais evidente na Base Comandante Ferraz, observa-se maior diminuição do IUV ao longo do século. Contudo essa diminuição, na estação em questão não supera 35%. A Figura 13 ilustra a evolução de CTO na primavera ao longo deste século para os dois RCP extremos. Em todas as localidades as estimativas de IUV são menores para o RCP 8.5.

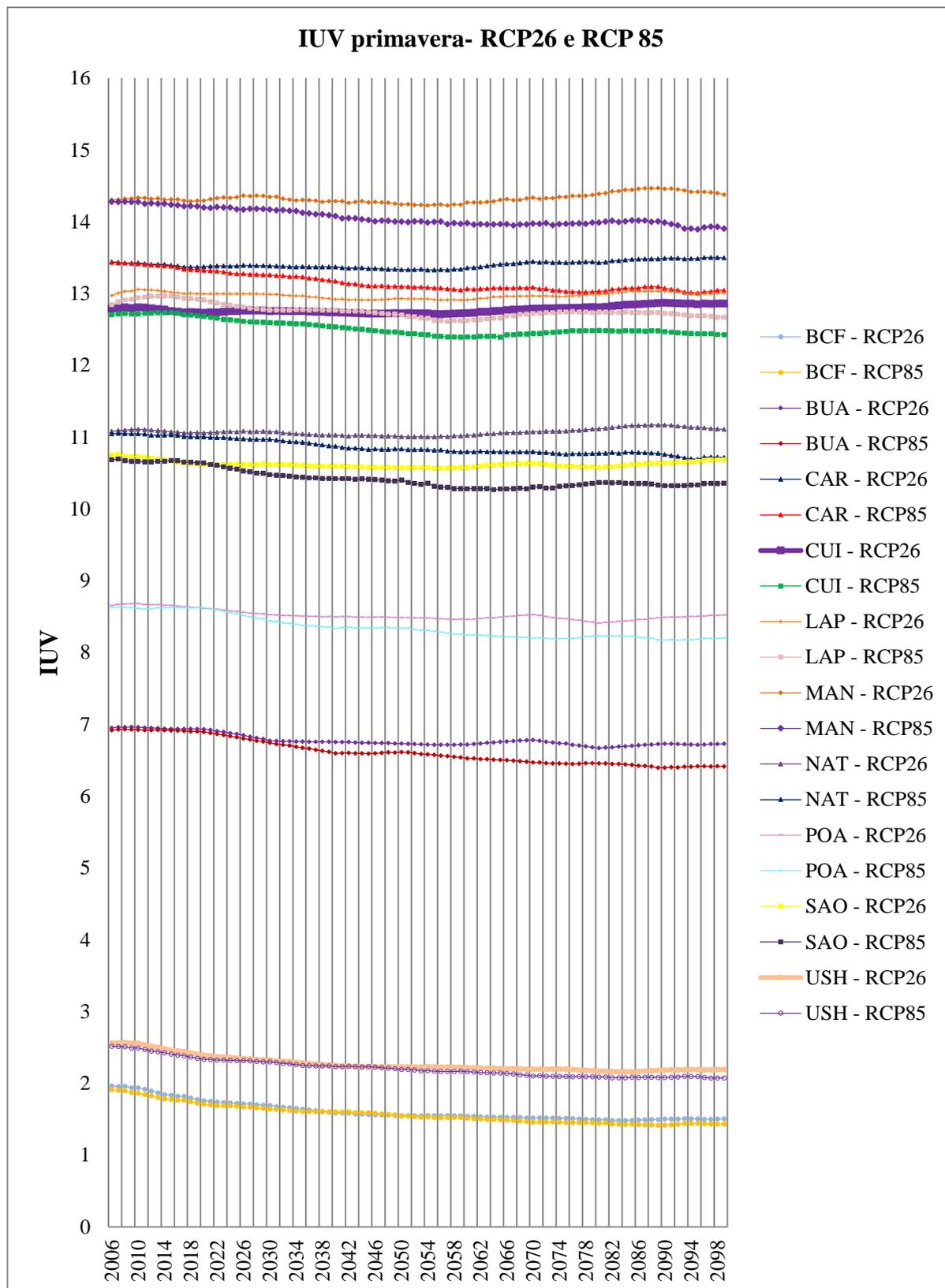


Figura 13 - Projeções de IUV para todas as localidades no período de primavera até o final do século – RCP26 e RCP85.

Na estação de verão, período de maiores valores de IUV, as estimativas ao longo do século variam de extremas a moderadas na América do Sul em sua totalidade (tabela 10). O IUV é extremo em grande parte da América do Sul. No território compreendido entre as latitudes 10°N a 35°S, há tendência de diminuição do IUV ao longo do século, entretanto, mesmo decrescendo, o IUV ainda é considerado extremo.

Nas regiões de baixas latitudes o decréscimo de IUV ao longo do século não é significativo na estação de verão (p-valor para Cuiabá, La Paz, Manaus e Natal respectivamente: 0.606; 0.083; 0.217; 0.712). Essa perspectiva confirma o grande risco à saúde pública do subcontinente como um todo, uma vez que a maior parcela da população sul-americana reside nessa faixa latitudinal.

Como descrito para a estação da primavera, a diminuição do IUV ao longo do século é mais significativa nas regiões de maiores latitudes. Contudo, o IUV é alto nessas localidades. Apenas na Base Comandante Ferraz observa-se IUV alto no início do século e moderado no final do século (tabela 11). Esse comportamento é devido ao aumento de CTO ao longo do século, sendo que, com citado anteriormente, o aumento é mais significativo nas regiões de maiores latitudes. Frente a tais projeções para o período de verão é importante ressaltar a necessidade do uso de medidas de proteção à R-UV pela população sul-americana em sua totalidade.

Tabela 11 - IUV no período de verão calculado para todas as localidades em três momentos: 2006, 2050 e 2100. Os valores entre parênteses representam o desvio padrão relacionado às variações entre os modelos.

	2006		2050		2100	
	RCP26	RCP85	RCP26	RCP85	RCP26	RCP85
CAR	15(1)	15(1)	14.8(1)	14.7(1.1)	15.1(1.2)	14.6(1.1)
MAN	13(0.6)	13(0.6)	13(0.7)	12.9(0.7)	13.1(0.8)	12.9(0.8)
NAT	11.7(0.6)	11.6(0.6)	11.6(0.7)	11.5(0.7)	11.7(0.7)	11.5(0.8)
CUI	14.5(0.9)	14.5(0.9)	14.5(1.1)	14.2(1)	14.5(1.1)	14.2(1.1)
LAP	14.9(1.1)	14.9(1)	14.8(1.2)	14.6(1.1)	14.8(1.3)	14.7(1.3)
SÃO	13.3(1.1)	13.3(1.1)	12.9(1.4)	12.6(1.5)	12.7(1.5)	12.4(1.8)
POA	13.3(0.9)	13.3(0.8)	13(1.1)	12.8(1)	12.9(1.1)	12.7(1.1)
BUA	12.3(0.8)	12.3(0.8)	11.9(0.9)	11.8(0.9)	11.8(1)	11.6(1)
USH	7.4(0.6)	7.4(0.6)	6.7(0.5)	6.7(0.6)	6.6(0.6)	6.3(0.5)
BCF	6(0.6)	6(0.6)	5.2(0.4)	5.1(0.3)	5(0.4)	4.8(0.3)

## 4.5. Dose Eritematosa Mínima

Para avaliar o impacto das mudanças de CTO sobre a saúde humana, foi calculada a média das diferenças entre as doses eritêmicas acumuladas da série histórica e as doses estimadas ao longo do século para cada estação do ano - DEM é a menor quantidade de energia eritematogênica suficiente para produzir a primeira reação perceptível de eritema (vermelhidão). Nessa análise também foram considerados os períodos T1 e T2 para comparações com os dados atuais e avaliar o comportamento das doses eritêmicas ao longo do século.

As diferenças relativas das doses acumuladas entre os dados atuais e o período T1 (tabela 12) indicam que nas áreas de maiores latitudes projeta-se diminuição das doses eritematosas. A redução das doses eritematosas na Base Comandante Ferraz, pode chegar a quase 40% no inverno e 30% na primavera para ambos cenários extremos (RCPs 2.6 e 8.5). A diferença das médias das doses entre T1 e os dados atuais no período da primavera é significativa nas seguintes localidades: Base Comandante Ferraz, Manaus, Natal, São Paulo e Ushuaia (respectivos p-valor: 0.013; 0.02; 0.023; 0.048; 0.026).

Tabela 12 – Médias das diferenças doses eritematosas entre os dados atuais e o período T1 (2050) para os dois cenários climáticos extremos (RCP 2.6 E RCP 8.5). Os valores entre parênteses indicam o desvio padrão.

Localidade	T1 - Dados atuais				
		Outono	Inverno	Primavera	Verão
Caracas	RCP26	7.7(5.6)	6.2(4.5)	0.6(0.4)	2.1(1.5)
	RCP85	6.7(4.9)	5.7(4.1)	-0.3(0.2)	1.5(1.1)
Manaus	RCP26	6.6(4.8)	6.5(4.8)	6.3(4.6)	6(4.4)
	RCP85	6.5(4.8)	6.3(4.6)	5.9(4.3)	5.6(4.1)
Natal	RCP26	7.3(5.4)	7(5.1)	6.4(4.7)	5.8(4.2)
	RCP85	7.3(5.3)	6.9(5)	6.1(4.4)	5.4(4)
Cuiabá	RCP26	3(2.2)	4(2.8)	5.6(4.1)	5.1(3.7)
	RCP85	2.8(2)	4(2.9)	5.2(3.7)	4.6(3.4)
La Paz	RCP26	4.4(3.2)	6.7(4.9)	8.2(6)	6.6(4.8)
	RCP85	3.9(2.8)	6.3(4.6)	7.1(5.2)	6(4.4)
São Paulo	RCP26	2.6(1.8)	7.1(5.2)	6.7(4.9)	-6.8(4.7)
	RCP85	2.3(1.7)	7.1(5.2)	6.3(4.6)	-7(4.8)
Porto Alegre	RCP26	2(1.4)	7.2(5.3)	4.6(3.3)	0(0)
	RCP85	1.7(1.2)	7(5.1)	4.4(3.2)	-0.1(0.1)
Buenos Aires	RCP26	3.1(2.2)	5.9(4.3)	1.8(1.3)	-1.7(1.2)
	RCP85	2.2(1.6)	5(3.6)	0.9(0.7)	-2.5(1.8)
Ushuaia	RCP26	-6.3(4.3)	-5.3(3.7)	-13.8(9.1)	-11.9(7.9)
	RCP85	-6.9(4.7)	-6.8(4.7)	-15.7(10.3)	-12.3(8.2)
Base Comandante Ferraz	RCP26	-5.7(3.9)	-36.7(21.9)	-28.7(17.7)	-16.1(10.5)
	RCP85	-6.6(4.5)	-38.1(22.6)	-29.3(18.1)	-17.1(11.1)

Observa-se redução nas doses eritematosas no período de verão para as localidades entre as latitudes 20°S e 35°S. A maior redução é observada em São Paulo no período de verão, cerca de 6% para o RCP 2.6 e 7% para o RCP 8.5.

Na estação do verão, as diferenças entre os cenários extremos no período T1 não são significativas apenas em três localidades: Ushuaia, Manaus e Natal. Em Manaus e Natal as diferenças entre os cenários RCP 26 e RCP 85 sobre as doses eritematosas calculadas não são significativas ao longo de todo o século (T1 e T2).

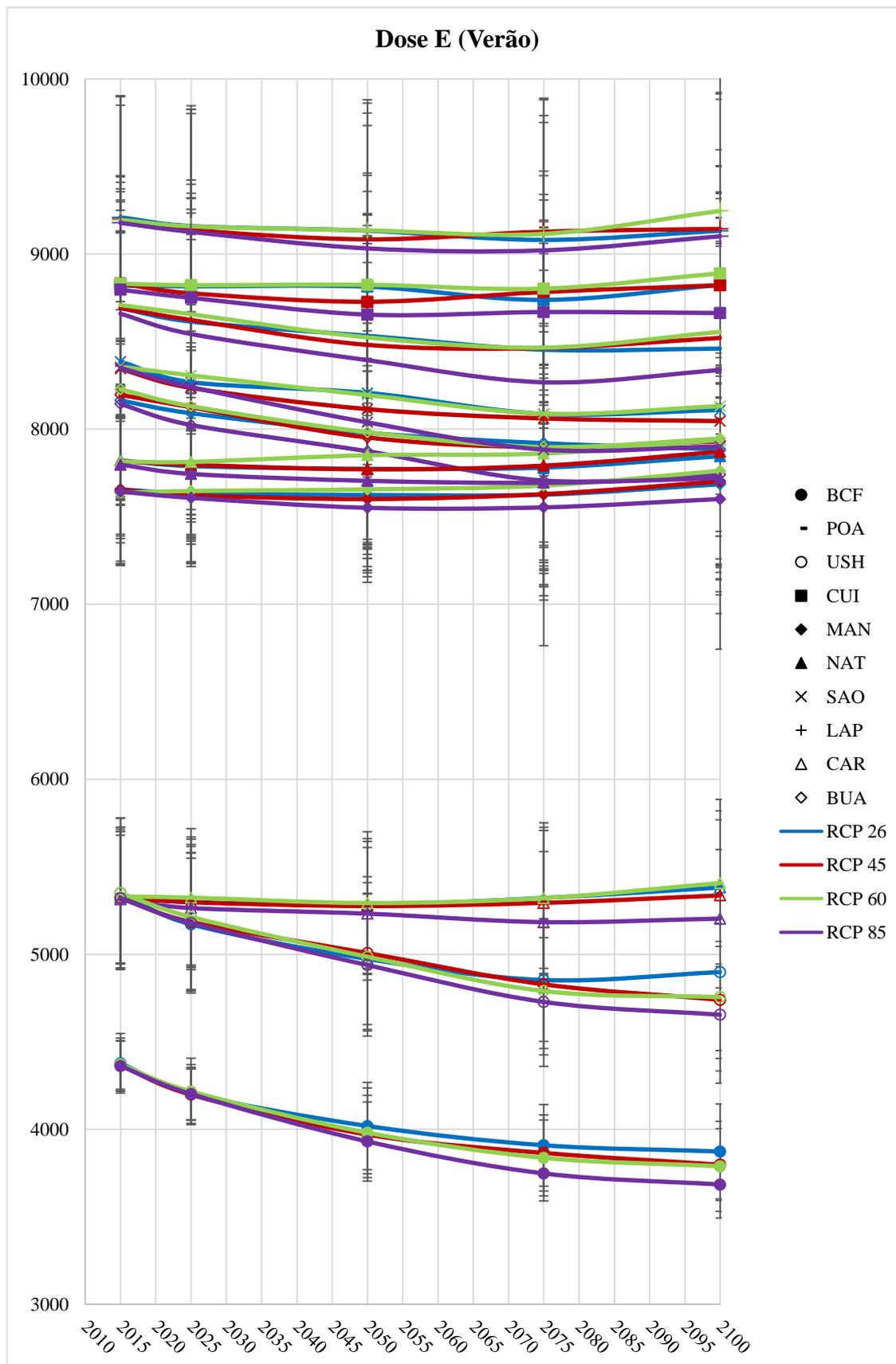


Figura 14 - Dose eritematosa acumulada ao longo do dia para cada localidade no período de verão. As barras verticais representam o desvio padrão relacionado à variação entre os modelos. Projeções para todos os cenários climáticos.

No inverno a diferença média entre os dados atuais e os dois períodos (T1 e T2) das doses eritematosas foi significativa apenas para Manaus e Natal (respectivos p-value T1: 0.003 e 0.01; T2: 0.05 e 0.011). As diferenças entre os cenários extremos foi significativa apenas para Natal (p-valor: 0.014).

No período T2 (tabela 13), a tendência observada na primeira metade do século é mantida, e observa-se maior atenuação das doses eritematosas. Nas áreas de maiores latitudes a diminuição observada no período T1 é acrescida em 10% no período T2. Para a América do Sul em geral, a perspectiva para segunda metade século é a diminuição das doses eritematosas, contudo estas ainda são maiores que as dos dados atuais nas regiões de baixas latitudes.

Tabela 13 – Média das diferenças das doses eritematosas entre os dados atuais e o período T2 (2100) para os dois cenários climáticos extremos (RCP 2.6 e RCP 8.5). Os valores entre parênteses indicam o desvio padrão.

Localidade	T2 - Dados atuais				
	Cenário	Outono	Inverno	Primavera	Verão
Caracas	RCP26	8.3(6.1)	6.6(4.8)	1.2(0.9)	3(2.2)
	RCP85	6.7(4.9)	5.5(4)	-2(1.4)	0.1(0.1)
Manaus	RCP26	6.6(4.8)	6.3(4.6)	5.5(4)	5.7(4.1)
	RCP85	6.5(4.7)	5.9(4.3)	4.6(3.3)	5.5(4)
Natal	RCP26	7.3(5.4)	6.9(5)	5.9(4.3)	5.6(4)
	RCP85	7(5.1)	6.6(4.8)	4.7(3.4)	5.1(3.7)
Cuiabá	RCP26	2.6(1.8)	3.8(2.7)	4.4(3.2)	4.9(3.6)
	RCP85	2.2(1.6)	3.2(2.3)	3.9(2.8)	4.3(3.1)
La Paz	RCP26	3.7(2.6)	6.3(4.6)	8.3(6.1)	6(4.4)
	RCP85	3.3(2.3)	4.5(3.3)	6.2(4.6)	5.5(4)
São Paulo	RCP26	2.1(1.5)	7.2(5.3)	6(4.4)	-6.4(4.4)
	RCP85	1.9(1.4)	6.5(4.7)	5.5(4)	-7.6(5.2)
Porto Alegre	RCP26	1.9(1.4)	7.1(5.2)	4.4(3.2)	0(0)
	RCP85	1.5(1.1)	6.3(4.6)	3.2(2.3)	-0.4(0.3)
Buenos Aires	RCP26	1.1(0.8)	4.1(2.9)	0.4(0.3)	-4(2.7)
	RCP85	-1.6(1.1)	0.9(0.6)	-4.2(2.9)	-6.4(4.4)
Ushuaia	RCP26	-11.5(7.7)	-9.2(6.2)	-20.6(13.2)	-18.5(12)
	RCP85	-16.3(10.6)	-12.5(8.3)	-26.9(16.7)	-23.2(14.7)
Base Comandante Ferraz	RCP26	-12(8)	-42.2(24.6)	-40.3(23.7)	-25.3(15.9)
	RCP85	-16.3(10.6)	-49.3(28)	-47.5(27.2)	-31.2(19.1)

Ao longo do século as doses eritematosas variam significativamente quando comparados os dois cenários climáticos extremos. Apenas em La Paz, na primavera os dois cenários não diferem significativamente. De maneira geral, as maiores diminuições das doses eritematosas ao longo do século são referentes ao RCP 8.5.

O impacto das variações das doses eritematosas ao longo do século sobre a saúde humana pode ser avaliado sob a perspectiva dos diferentes fototipos. Quanto menor o fototipo, menor é o

tempo de exposição para causar o eritema. As variações das doses eritematosas diárias podem resultar em mudanças no tempo de exposição à R-UV considerado seguro para cada fototipo. O tempo de exposição para causar eritema corresponde ao quociente entre a E-UV e a MED.

Para indivíduos de fototipo II e V, o tempo de exposição para causar eritema não apresentou variação ao longo do século nas regiões de maiores latitudes (tabela 14). Nas regiões próximas ao Equador a variação entre as estações do ano no tempo de exposição é de no máximo seis minutos para indivíduos fototipo II. Para os indivíduos fototipo V as diferenças nos tempos de exposição pode chegar a 16 minutos entre as estações do ano.

Nas cidades de La Paz, São Paulo e Porto Alegre observa-se que o tempo de exposição entre as estações de verão, primavera e outono não apresenta diferenças superiores a três minutos para ambos fototipos. Apenas na estação de inverno observam-se maiores diferenças entre as outras estações. Quando comparado às outras estações, o tempo de exposição no inverno superar 10 a 30 minutos para indivíduos fototipo II, e até mais de uma hora para indivíduos fototipo V.

Mesmo com a tendência de aumento de ozônio ao longo do século, não é observada diminuição do risco de exposição ao sol ao longo do século quando comparada a realidade atual, uma vez que não foi observado aumento no tempo de exposição para causar eritema em fototipos II e V.

Tabela 14 - Tempo de exposição (minutos) projetados para 2050 e 2100 próximo ao meio dia local para causar eritema em indivíduos de fototipo II e V.

Localidade	Outono		Inverno		Primavera		Verão	
	II	V	II	V	II	V	II	V
CAR	13	31	13	32	14	33	14	35
MAN	11	26	15	38	12	29	12	30
NAT	12	28	18	44	13	33	13	32
CUI	14	34	15	38	14	35	13	32
LAP	12	29	22	53	13	31	11	26
SAO	14	34	31	78	16	38	13	30
POA	17	41	47	121	20	47	12	30

Independente do cenário climático ressalta-se que mesmo com a tendência de diminuição, as doses eritematosas acumuladas ao longo do dia no período do verão, na América do Sul em sua totalidade, implicam em grande risco à saúde da população. Essa diminuição não foi significativa sobre o impacto no tempo de exposição ao Sol efetivo para causar eritema.

## 4.6. Dose Para Síntese de Vitamina D

Para avaliar o efeito das mudanças climáticas sobre os benefícios da exposição à R-UV, foi feita a projeção das doses para síntese de vitamina D. As análises para síntese de vitamina D foram conduzidas da mesma maneira que as doses para causar eritema, comparação dos dados atuais com os de dois períodos do século XXI (T1 e T2).

O aumento do CTO e a diminuição da R-UV que atinge a superfície, implicam em menores doses diárias acumuladas. Portanto, nas localidades em que foi observado aumento do CTO pode-se esperar diminuição nas doses para síntese de vitamina D, principalmente pelo fato que a síntese de vitamina D é função exclusiva da R-UVB que é fortemente absorvida pelo ozônio.

O comportamento da D-UV é semelhante ao da E-UV. Nas localidades de maiores latitudes, onde são observados maiores aumentos de CTO ao longo do século, é observada a tendência de diminuição da D-UV em todas as estações do ano. Em Ushuaia e na Base Comandante Ferraz, a diminuição de D-UV é esperada em todos os cenários climáticos. Essa tendência é mais evidenciada para o RCP 8.5, cenário em que foram observados maiores níveis de CTO.

Nas outras regiões de estudo não foi observada diminuição da D-UV, mas sim tendência de aumento. A tendência de aumento da D-UV é importante e seria benéfica para saúde humana. Contudo, nessas situações, a E-UV também apresenta tendência de aumento, o que representa risco de exposição.

Quase todas as localidades apresentaram diferença significativa nas diferenças médias de D-UV. Não foi observada diferença significativa na Base Comandante Ferraz na primeira metade do século. Na segunda metade do século a cidade de Caracas não apresentou diferença significativa. As projeções para o cenário de menor poluição não foram significativamente diferentes dos dados atuais para Base Comandante Ferraz, Cuiabá, La Paz e Manaus.

Em São Paulo, Porto Alegre e Buenos Aires as menores diferenças, para o período T1 (tabela 15), foram observadas apenas no verão. Em compensação, na estação de inverno o aumento pode ser superior a 10%.

Tabela 15 – Média da diferença relativa (%) das doses diárias acumuladas para síntese de vitamina D. Dentre os dados atuais e o período T1 (2050) para os dois cenários climáticos extremos (RCP 2.6 E RCP 8.5). Os valores entre parênteses indicam o desvio padrão.

Localidade	T1 - Dados atuais				
	Cenário	Outono	Inverno	Primavera	Verão
Caracas	RCP26	8.3(6.1)	6.9(5.1)	0.6(0.4)	2.4(1.7)
	RCP85	7.2(5.3)	6.4(4.6)	-0.3(0.2)	1.7(1.2)
Manaus	RCP26	7.1(5.2)	7.4(5.4)	6.9(5.1)	6.6(4.8)
	RCP85	7(5.1)	7.2(5.3)	6.4(4.7)	6.1(4.5)
Natal	RCP26	7.9(5.8)	8.1(6)	7(5.2)	6.4(4.7)
	RCP85	7.9(5.8)	7.9(5.9)	6.7(4.9)	6(4.4)
Cuiabá	RCP26	3.2(2.3)	4.9(3.5)	6.2(4.5)	5.5(4)
	RCP85	3(2.1)	4.9(3.6)	5.7(4.1)	5(3.6)
La Paz	RCP26	4.8(3.5)	8.1(6)	9.1(6.7)	7.1(5.2)
	RCP85	4.2(3.1)	7.6(5.6)	7.9(5.8)	6.5(4.8)
São Paulo	RCP26	2.9(2.1)	9.3(6.9)	7.8(5.8)	-7.9(5.4)
	RCP85	2.6(1.9)	9.2(6.8)	7.2(5.3)	-8.1(5.5)
Porto Alegre	RCP26	2.3(1.6)	10.5(7.9)	5.6(4.1)	-0.1(0)
	RCP85	2(1.5)	10.3(7.7)	5.4(3.9)	-0.2(0.1)
Buenos Aires	RCP26	3.8(2.7)	9.5(7.1)	2.2(1.6)	-2(1.4)
	RCP85	2.7(1.9)	8.1(5.9)	1.1(0.8)	-3(2.1)
Ushuaia	RCP26	-8.3(5.6)	-2.5(1.7)	-23.1(14.7)	-15.8(10.4)
	RCP85	-9.4(6.3)	-6.6(4.5)	-26.9(16.8)	-16.4(10.7)
Base Comandante Ferraz	RCP26	-6.7(4.6)	-76.4(39.1)	-54.4(30.3)	-22.9(14.5)
	RCP85	-8.4(5.7)	-81.1(40.8)	-55.8(30.9)	-24.5(15.4)

No outono as diferenças médias entre os dados atuais e as projeções ao longo do século não foram significativas em Manaus e Natal. Esta última foi a única a não apresentar diferença entre a primeira e a segunda metade do século. Não foram constatadas diferenças significativas entre os cenários climáticos extremos em nenhuma localidade.

Na primavera a diferença média entre as doses de D-UV históricas e T1 não foram significativas em Manaus, Natal, Ushuaia e Base Comandante Ferraz. Esta última também não apresentou diferença significativa entre os dados atuais e T2. Todas as localidades apresentaram diferenças significativas entre a primeira e a segunda metade do século.

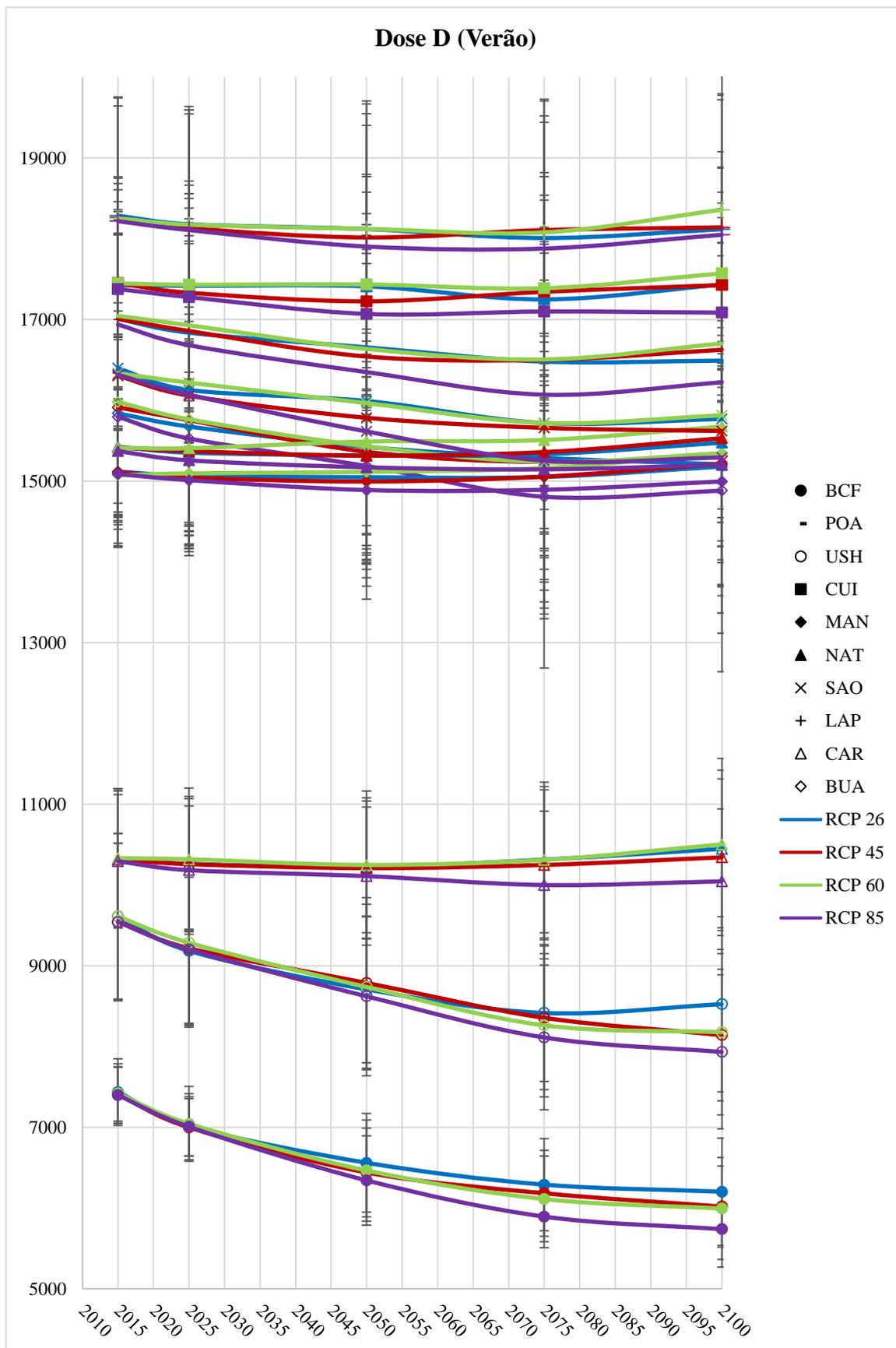


Figura 15 - Dose de radiação acumulada para síntese de vitamina D ao longo do dia para cada localidade no período de verão. As barras verticais representam o desvio padrão relacionado à variação entre os modelos. Projeções para todos os cenários climáticos.

No período T2 (tabela 16), a previsão de aumento de CTO atinge uma área maior e implica em maior número de localidades com diminuição de D-UV. Além de Ushuaia e Base Comandante Ferraz, Buenos Aires apresenta diminuição das médias de D-UV para o RCP 8.5 em todas as estações, exceto no inverno, período em que se pode esperar aumento inferior a 3%.

Tabela 16 – Médias da diferença relativa (%) das doses diárias acumuladas para síntese de vitamina . Dentre os dados atuais e o período T2 (2100) para os dois cenários climáticos extremos (RCP 2.6 E RCP 8.5). Os valores entre parênteses indicam o desvio padrão.

Localidade	T2 - Dados atuais				
	Cenário	Outono	Inverno	Primavera	Verão
Caracas	RCP26	8.9(6.6)	7.4(5.4)	1.3(0.9)	3.5(2.5)
	RCP85	7.2(5.3)	6.2(4.5)	-2.3(1.6)	0(0)
Manaus	RCP26	7.1(5.2)	7.1(5.2)	6(4.4)	6.2(4.6)
	RCP85	6.9(5.1)	6.7(4.9)	5(3.6)	6.1(4.5)
Natal	RCP26	7.9(5.8)	7.9(5.8)	6.5(4.7)	6.1(4.5)
	RCP85	7.6(5.6)	7.6(5.6)	5.2(3.8)	5.6(4.1)
Cuiabá	RCP26	2.7(1.9)	4.7(3.4)	4.9(3.5)	5.3(3.8)
	RCP85	2.3(1.7)	3.9(2.8)	4.3(3.1)	4.6(3.3)
La Paz	RCP26	4(2.9)	7.6(5.6)	9.2(6.8)	6.4(4.7)
	RCP85	3.5(2.5)	5.4(4)	6.9(5.1)	5.9(4.3)
São Paulo	RCP26	2.4(1.7)	9.4(6.9)	7(5.1)	-7.4(5)
	RCP85	2.1(1.5)	8.4(6.2)	6.4(4.7)	-8.8(6)
Porto Alegre	RCP26	2.3(1.6)	10.4(7.8)	5.4(3.9)	-0.1(0.1)
	RCP85	1.7(1.2)	9.3(6.9)	4(2.9)	-0.6(0.4)
Buenos Aires	RCP26	1.3(0.9)	6.7(4.9)	0.4(0.3)	-4.7(3.2)
	RCP85	-1.9(1.3)	1.5(1)	-5.9(4)	-7.5(5.1)
Ushuaia	RCP26	-16.8(11)	-13.3(8.8)	-37.4(22.3)	-25.4(15.9)
	RCP85	-25.2(15.8)	-23.3(14.8)	-51.2(28.8)	-32.3(19.7)
Base Comandante Ferraz	RCP26	-18.1(11.8)	-94.8(45.5)	-84.7(42.1)	-37.8(22.5)
	RCP85	-26.7(16.7)	-121.3(53.4)	-105.4(48.8)	-48(27.4)

A tendência da D-UV, em função dos diferentes cenários climáticos ao longo do século, foi semelhante para todas as localidades. O cenário mais extremo, RCP 8.5, na maioria das regiões, apresentou menores valores de D-UV quando comparado ao RCP 26 (diferenças entre 0.1% e 28.5%).

Para melhor analisar o risco da baixa disponibilidade de D-UV foi calculado, tal como para E-UV, o tempo de exposição necessário para síntese de vitamina D para os fototipos II e V (tabela 17). Contatou-se que mesmo nas localidades em que se observou diminuição da D-UV ao longo do século, essa diminuição não afetou o tempo de exposição necessário para síntese de vitamina D, uma vez que o tempo de exposição para todas as estações em 2050 foi o mesmo calculado para 2100.

O tempo de exposição foi calculado para o período próximo ao meio dia local, considerando a exposição de corpo inteiro. Para indivíduos fototipo II, o tempo de exposição predominante necessário para síntese de vitamina D foi 1 minuto. O maior tempo de exposição encontrado foi de 5 minutos no período de inverno na região de Porto Alegre.

Para indivíduos fototipo V o tempo de exposição para síntese de vitamina D varia pouco dentre as estações nas regiões próximas ao Equador, a variação média é de 1 minuto. Como esperado, os maiores tempos de exposição são encontrados no período de inverno para as cidades de La Paz, São Paulo e Porto Alegre. Contudo, 10 minutos de exposição é mais que suficiente para garantir uma dose de D-UV.

Tabela 17 - Tempo de exposição (minutos) próximo ao meio dia local para síntese de 1000 IU de vitamina D em indivíduos de fototipo II e V com exposição de corpo inteiro.

Localidade	Outono		Inverno		Primavera		Verão	
	II	V	II	V	II	V	II	V
CAR	1	3	1	3	1	3	1	3
CUI	1	3	1	3	1	3	1	3
LAP	1	3	2	5	1	3	1	2
MAN	1	2	1	3	1	3	1	3
NAT	1	3	2	4	1	3	1	3
SAO	1	3	3	7	1	3	1	3
POA	2	4	5	9	2	4	1	3

## 5. Conclusão

Foram realizadas simulações do IUV, dose eritematosa e de síntese de vitamina D ao longo do século XXI sob a perspectiva de quatro diferentes cenários de concentrações de conteúdo total de ozônio estabelecidos no quinto relatório do IPCC. As simulações foram realizadas utilizando dados de conteúdo total de ozônio de quatro modelos climáticos. A principal motivação foi desenvolver o conhecimento sobre as mudanças do conteúdo de ozônio sobre a América do Sul e as implicações sobre a saúde.

O aumento de CTO foi consenso entre todos os modelos e cenários climáticos considerados. O aumento do ozônio estratosférico ao longo do século já era previsto devido a recuperação da camada de ozônio, graças ao comprometimento da Comunidade Global às resoluções do protocolo de Montreal pela. Contudo, o impacto da recuperação da camada de ozônio não se estende para as áreas de baixas latitudes pois estas não sofrem influência do buraco de ozônio.

Todos os modelos apresentam valores crescentes de CTO ao longo do século na América do Sul. Dentre os modelos climáticos analisados (CSIRO, CCSM4, IPSL e MIROC), foi observado que o modelo CSIRO apresenta maiores médias dos valores de CTO, enquanto que o modelo CCSM4 apresenta os menores valores. Observou-se também que a diferença entre os quatro modelos estudados é significativa. Sugere-se, para estudos posteriores, analisar e descrever os impactos sobre as doses de R-UV sob a perspectiva de cada modelo climático.

Ao analisar o comportamento do ozônio sob a perspectiva dos diferentes cenários climáticos, conclui-se que os maiores valores de CTO são estimados para o cenário de maior poluição, o RCP 8.5. O mesmo resultado foi estimado nas projeções feitas para Europa. Corrêa *et al.* (2013), observaram maiores atenuações de CTO no período de primavera para os cenários de maior poluição. Além disso, ressalta-se que as diferenças entre os cenários de baixa emissão de GEE e os cenários de emissões intermediárias não são significativas em grande parte das localidades estudadas. Observou-se que a atenuação da R-UV é mais acentuada para os cenários de extrema poluição, quando comparado ao cenário mais de menor poluição.

O aumento do CTO para as regiões de baixas e médias latitudes não é suficiente para provocar mudanças nos impactos sobre a saúde da população ao longo do século. Nestas regiões, a alta incidência de R-UV ao longo do ano não sofre atenuação representativa em

virtude do t nuve aumento do CTO. Conseqüentemente, não são constatadas variações do IUV e das doses de E-UV e D-UV suficientes para promover mudanças na saúde da população.

A diminuição do IUV e das doses de E-UV ao longo do século não é suficiente para diminuir o risco de exposição   R-UV. Nas regiões mais populosas, isto é, em baixas e médias latitudes da América do Sul, as projeções dos níveis de IUV indicam valores altos e extremos para todos os cenários climáticos. Em nenhuma das localidades estudadas foram observadas mudanças nos níveis de IUV suficientes para sugerir um relaxamento dos hábitos de comportamento de exposição da população.

As mudanças do CTO nas regiões de menores latitudes estudadas não foram significativas sobre a dose de E-UV acumulada. As regiões de médias latitudes s  apresentaram tendência de redução das doses eritematosas no período de verão para o RCP 8.5. A tendência de diminuição nas doses de E-UV calculadas, significativas ou não, não resultaram em diferentes tempos de exposição suficiente para causar eritema. Isso quer dizer que, mesmo que tenham sido observadas diferenças significativas entre a primeira e a segunda metade do século sobre as doses de E-UV o tempo de exposição em minutos para causar eritema não variou para o mesmo período em questão.

Os resultados sobre as doses de D-UV foram semelhantes aos das doses de E-UV. As variações sobre as doses de D-UV ao longo do século não foram traduzidas em diferentes tempos de exposição quando comparadas a primeira e a segunda metade do século. Os tempos de exposição (braços, pernas e rosto) para síntese de 1000 IU de vitamina D calculados foram no mínimo uma dezena de minutos menores que o tempo de exposição para causar eritema. A quantidade de R-UV projetada até o final do século que atinge a superfície da Terra nas regiões de baixas e médias latitudes são suficientes para síntese de vitamina D em todas as estações do ano ao longo de todo o século. Nestas regiões, o tempo de exposição para síntese de vitamina D variou de 1 a 9 minutos de acordo com o fototipo e estação do ano.

Nas regiões de baixas e médias latitudes em todas as estações do ano o tempo de exposição para síntese de vitamina D, considerando a exposição de braços, pernas e rosto, é inferior a dez minutos para os fototipos I a V. Para os fototipos II, III, IV e V o tempo de exposição de 9 minutos em todas as estações do ano, horário de meio dia local, é suficiente para produzir uma dose de vitamina D sem risco de desenvolver eritema. Acima de dez minutos de tempo de exposição, dependendo do fototipo e da estação do ano, atinge-se o patamar das

doses eritematosas. Deve-se salientar que o tempo de exposição é uma medida comparativa e pouco eficaz no que diz respeito a síntese de vitamina D em um indivíduo qualquer. A síntese dessa vitamina depende de diversos fatores extrínsecos à exposição ao Sol, tais como idade, alimentação, cor da pele, saúde do indivíduo, dentre outros.

As projeções de aumento do conteúdo total de ozônio ao longo do século na América do Sul não refletem em efeito protetor ou indicam possibilidade de menores danos à saúde causados pela exposição indevida à R-UV. A incidência de R-UV em grande parte do continente sul-americano, em todas as estações do ano, continuará sendo um risco à saúde da população ao longo de todo o século, independente dos cenários climáticos. Medidas educativas e preventivas de exposição à R-UV devem ser desenvolvidas e estimuladas nos países da América do Sul a fim de promover a saúde da população.

As mudanças climáticas afetam outros componentes atmosféricos além do CTO com consequências sobre a RUV em superfície. Para aprimorar e ampliar o conhecimento sobre as projeções de RUV e seu impacto sobre a saúde é importante ressaltar a necessidade de futuros estudos que considerem outros parâmetros atmosféricos como propriedades de nuvens, aerossóis, albedo de superfície e variáveis atmosféricas locais.

## Referências Bibliográficas

ABARCA, J. F.; CASICCIA, C. C.; ZAMORANO, F. D. Increase in sunburns and photosensitivity disorders at the edge of the Antarctic ozone hole, Southern Chile, 1986-2000. **Journal of the American Academy of Dermatology**, fevereiro 2002. 193 -199.

ACEITUNO-MADERA, P. et al. Melanoma, altitud y radiación UVB. **Actas Dermo-Sifiliográficas**, ABRIL 2011. 199–205.

ALIMIRAH, F. et al. Functional Significance of Vitamin D Receptor FokI Polymorphism in Human Breast Cancer Cells. **PLoS ONE**, janeiro 2011. 496-500.

AMBACH, W.; BLUMTHALER, M. Biological effectiveness of solar UV radiation in humans. **Experientia**, Suíça, 1993. 747-753.

AUCAMP, P. J.; BJÖRN, L. O.; LUCAS, R. Questions and answers about the environmental effects of ozone depletion and its interactions with climate change: 2010 assessment. **Photochemical & Photobiological Sciences**, outubro 2011. 301-316.

BAIS., A. F. et al. Projections of UV radiation changes in the 21st century: impact of ozone recovery and cloud effects. **Atmospheric Chemistry and Physics**, 2011. 7533–7545.

BARON, E. D.; SUGGS, A. K. Introduction to Photobiology. **Dermatologic Clinics**, julho 2014. 255–266.

BLACUTT, L. A. El Índice Ultravioleta. In: SACCHETTI, F. Z.; GISBERT, R. F. **La Radiación Ultravioleta en Bolivia**. 1. ed. La Paz: OPS/OMS, 2002. Cap. 10, p. 123-138.

BLUMTHALER, M.; AMBACH, W.; ELLINGER, R. Increase in solar UV radiation with altitude. **Journal of Photochemistry and Photobiology**, 1997. 130-134.

BOUILLON, R. et al. **Action spectrum for the production of previtamin D3 in human skin**. Commission Internationale de l'éclairage (CIE). [S.l.], p. 12. 2006. (174).

BRENNER, M.; HEARING, V. J. The Protective Role of Melanin Against UV Damage in Human Skin. **Photochemistry and Photobiology**, 2008. 539–549.

CASICCIA, C.; KIRCHHOFF, V. W. J. H.; TORRES, A. Simultaneous measurements of ozone and ultraviolet radiation: spring 2000, Punta Arenas, Chile. **Atmospheric Environment**, janeiro 2003. 383–389.

CHAPMAN, S. The photochemistry of atmospheric oxygen. **Reports on progress in physics**, 1942. 92 - 100.

CHRISTAKOS, S. et al. Vitamin D: beyond bone. **ANNALS OF THE NEW YORK ACADEMY OF SCIENCES**, maio 2013. 45 -58.

COARITI, J. R. et al. **Análise dos efeitos da radiação solar ultravioleta (R-UV) em populações altitudes**. In: XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia. Belém: [s.n.]. 2010.

CORRÊA, M. D. P. et al. Projected changes in clear-sky erythemal and vitamin D effective UV doses for Europe over the period 2006 to 2100. **PhoCTOchem. Photobiol. Sci.**, 2013. 1053–1064.

CORRÊA, M. D. P.; CEBALLOS, J. C. Solar Ultraviolet Radiation Measurements in One of the Most Populous Cities of the World: Aspects Related to Skin Cancer Cases and Vitamin D Availability. **PhoCTOchemistry and Photobiology**, 2010. 438–444.

CORRÊA, M. D. P.; PIRES, L. C. M. Doses of erythemal ultraviolet radiation observed in Brazil. **International Journal of Dermatology**. 966–973.

CORRÊA, M. P. Índice Ultravioleta: Avaliações e Aplicações. **Dissertação (Doutor em Ciências) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo**, São Paulo, 2003. 243.

CORRÊA, M. P.; DUBUISSON, P.; PLANA-FATTORI, A. An Overview of the Ultraviolet Index and the Skin Cancer Cases in Brazil. **PhoCTOchemistry and Photobiology**, 2003. 49-54.

CUBASCH, U. et al. **Introduction. In:** Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, Reino Unido e Nova Iorque, Estados Unidos: Cambridge University Press, 2013.

DIAZ, S. et al. Ozone and UV radiation over southern South America: Climatology and anomalies. **PhoCTOchemistry and Photobiology**, 2006. 834 -843.

DIFFEY, B. L. Ultraviolet radiation physics and the skin. **Phys. Meddical Biology**, 1980. 405-426.

DIJK, A. V. et al. Skin Cancer Risks Avoided by the Montreal ProCTOol—Worldwide Modeling Integrating Coupled Climate-Chemistry Models with a Risk Model for UV. **PhoCTOchemistry and Photobiology**, 2013. 234–246.

DOUGLASS, A. et al. Stratospheric Ozone and Surface Ultraviolet Radiation. In: \_\_\_\_\_ **Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2010**, Global Ozone Research and Monitoring Project - Report N°52. Genebra, Suíça: World Meteorological Organization, 2011. Cap. 2, p. 516.

ELIAS, A. G. Lower and middle atmosphere and ozone. **Solar and Stellar Variability: Impact on Earth and Planets**, 2009. 336-342.

ENGELSEN, O. The Relationship between Ultraviolet Radiation Exposure and Vitamin D Status. **Nutrients**, 2010. 482-495.

FANG, F. et al. Prediagnostic plasma vitamin D metabolites and mortality among patients with prostate cancer, abril 2011. 676-680.

FARMAN, J. C.; GARDINER, B. G.; SHANKLIN, J. D. Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO<sub>x</sub>/NO<sub>x</sub> interaction. **Nature**, p. 207 - 210, maio 1985.

FIOLETOV, V.; KERR, J. B.; FERGUSSON, A. The UV Index: Definition, Distribution and Factors Affecting It. **Canadian Journal of Public Health**, julho/agosto 2010. I5-I9.

- FITZPATRICK, T. B. The Validity and Practicality of Sun-Reactive Skin Types I through VI. **Arch Dermatol**, junho 1988. 869-871.
- FLATO, G. et al. **Evaluation of Climate Models. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** Cambridge University. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, p. 741-866. 2013.
- GALLAGHER, R. P.; LEE, T. K. Adverse effects of ultraviolet radiation: A brief review. **Progress in Biophysics and Molecular Biology**, 28 fevereiro 2006. 119–131.
- GODIN-BEEKMANN, S. Spatial observation of the ozone layer. **Comptes Rendus Geoscience**, p. 339–348, jan 2010.
- GROFF, A. A. et al. UVA/UVB-induced genotoxicity and lesion repair in *Colossoma macropomum* and *Arapaima gigas* Amazonian fish. **Journal of photochemistry and photobiology**, maio 2010. 93-99.
- GRUIJL, F. R. D. Skin Cancer and Solar UV Radiation. **European Journal of Cancer**, 1999. 2003-2009.
- GRUIJL, F. R. D.; LEUN, J. C. V. D. Environment and health: 3. Ozone depletion and ultraviolet radiation. **Canadian Medical Association**, outubro 2000.
- HAGENAU, T. et al. Global vitamin D levels in relation to age, gender, skin pigmentation and latitude: an ecologic meta-regression analysis. **Osteoporos Int**, 6 maio 2008. 133–140.
- HAN, A.; CHIEN, A. L.; KANG, S. Photoaging. **Dermatologic Clinics**, julho 2014. 291–299.
- HARRISON, G. I.; YOUNG, A. R. Ultraviolet radiation-induced erythema in human skin. **Methods**, 2002. 14–19.
- HARTMANN, D. L. et al. Can ozone depletion and global warming interact to produce rapid climate change? **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, 15 fevereiro 2000. 1412–1417.
- HIBBARD, K. A.; MEEHL, G. A.; P.M. COX. A Strategy for Climate Change Stabilization Experiments. **EOS**, maio 2007. 217-221.
- INCA, ( . N. D. C. **Câncer no Brasil: dados dos registros de base.** Rio de Janeiro: [s.n.], v. IV, 2010.
- INCA, ( . N. D. C. **Estimativa 2014: Incidência de Câncer no Brasil.** Rio de Janeiro: INCA, 2014.
- JONES, A.; BOWDEN, T.; TURNER, J. Predicting total ozone based on GTS data: applications for South American high-latitude populations. **Journal of applied meteorology**, maio 1998. 477-485.
- KARPECKI, P. The role of UV damage in ocular disease. **Review of optometry**, outubro 2012. S1+.
- KAYSER, D.; VEEN, H. V. D. **UNDP Protecting the Ozone Layer - Montreal ProCTool on Substances that Deplete the Ozone Layer - 20 Years of Success.** [S.l.]: Montreal ProCTool Unit - Environment and Energy Group, 2007.

- KERR, J. B. Understanding the Factors that Affect Surface UV Radiation. **Proceedings of SPIE**, 2003. 1-14.
- KIGUTI, V. A. K.; SEO, E. S. M.; VILELA-JUNIOR, A. RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA: UMA AVALIAÇÃO EM SÃO PAULO. **INTERFACEHS – Revista de Gestão Integrada em Saúde do Trabalho e Meio Ambiente**, abril 2009. 1-22.
- KIRCHHOFF, V. W. J. H.; ZAMORANO, F.; CASICCIA, C. UV-B enhancements at Punta Arenas, Chile. **Journal of PhoCTOchemistry and Photobiology**, 1997. 174-177.
- KOLLER, L. R. **Ultraviolet radiation**. Nova Iorque: John & Wiley and Sons, 1952.
- LACY, K.; ALWAN, W. Skin cancer. **Medicine**, julho 2013. 402–405.
- LAI-CHEONG, J. E.; MCGRATH, J. A. Structure and function of skin, hair and nails. **Medicine**, junho 2013. 317 -320.
- LI, B. et al. Spatial and temporal variations of AOD over land at the global scale. **International journal of remote sensing**, 10 abril 2012. 2097 -2111.
- LIN, J. Y.; FISHER, D. E. Melanocyte biology and skin pigmentation. **Nature**, fevereiro 2007. 843-850.
- LOPO, A. B.; SPYRIDES, M. H. C.; LUCIO, P. S. ÍNDICE DE RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA MÁXIMO DA CIDADE DE NATAL: MODELAGEM VIA MÉTODO UNIVARIADO SARIMA. **Anais do Congresso de Matemática Aplicada e Computacional (CMAC)**, 2012. 414-417.
- MADAN, V.; LEAR, J. T.; SZEIMIES, R.-M. Non-melanoma skin cancer. **Lancet**, Londres, fevereiro 2010. 673 -685.
- MARROT, L.; MEUNIER, J.-R. Skin DNA photodamage and its biological consequences. **Journal of the American Academy of Dermatology**, maio 2008. 139–148.
- MATSUMURA, Y.; ANANTHASWAMY, H. N. Toxic effects of ultraviolet radiation on the skin. **Toxicology and Applied Pharmacology**, 2004. 298–308.
- MCKENZIE, R. et al. **Erythema versus vitamin D production from sunlight and solaría**. National Institute of Water and Atmospheric Research (NIWA), UV Workshop 2010. [S.l.]: [s.n.]. 2010.
- MCKENZIE, R. et al. Serum 25-hydroxyvitamin-D responses to multiple UV exposures from solaría: inferences for exposure to sunlight. **PhoCTOchem. Photobiol. Sci.**, 13 março 2012. 1174–1185.
- MCKENZIE, R. L. et al. Ozone depletion and climate change: impacts on UV radiation. **PhoCTOchemical & Photobiological Sciences**, outubro 2011. 182–198.
- MCMICHAEL, A. J. et al. Stratospheric ozone depletion, ultraviolet radiation and health. **Climate change and human health: risks and responses.**, Geneva: World Health Organization, 2003. 20-21.
- MEINSHAUSEN, M. et al. The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. **Climatic Change**, 2011. 213–241.

- MONTAGNER, S.; COSTA, A. Bases biomoleculares do fotoenvelhecimento. **Anais Brasileiros de Dermatologia**, 2009. 263-269.
- NEWMAN, P. A.; MCKENZIE, R. UV impacts avoided by the Montreal ProCTOol. **PhoCTOchemical & Photobiological Sciences**, p. 1152–1160, março 2011.
- NORVAL, M. et al. The human health effects of ozone depletion and interactions with climate. **PhoCTOchemical & Photobiological Sciences**, 2011. 199–225.
- NORVAL, M.; BJÖRNBC, L. O.; GRUIJL, F. R. D. Is the action spectrum for the UV-induced production of previtamin D3 in human skin correct? **PhoCTOchemical & Photobiological Sciences**, v. 9, p. 11 -17, outubro 2009.
- NUNEZ, M.; FORGAN, B.; ROY, C. Estimating ultraviolet radiation at the earth's surface. **Int J Biometeorol**, p. 5-17, 1994.
- PETER, T. THE STRATOSPHERIC OZONE LAYER AN OVERVIEW. **Environmental Pollution**, v. 69-79, 1994.
- PHARMD, C. B. et al. Skin Cancer in Skin of Color: An Update on Current Facts, Trends, and Misconceptions. **Journal of Drugs in Dermatology**, fevereiro 2013. 194 -198.
- POPE, S. J. et al. Action Spectrum Conversion Factors that Change Erythemally Weighted to Previtamin D sub(3)-weighted UV Doses. **PhoCTOchemistry and photobiology**, 2008. 1277 -1283.
- RIGEL, D. S.; RIGEL, E. G.; RIGEL, A. C. Effects of altitude and latitude on ambient UVB radiation. **Journal of the American Academy of Dermatology**, Nova Iorque, janeiro 1999. 115-116.
- ROUSSEAU, M. C. et al. Ozone depletion and UVB radiation: Impact on plant DNA damage in southern South America. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, 21 dezembro 1999. 15310–15315.
- SA, R. V. et al. **CLIMATOLOGIA DO ÍNDICE ULTRAVIOLETA PARA AS CAPITAIS BRASILEIRAS UTILIZANDO AS SÉRIES HISTÓRICAS (1979-2003)**. In: XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia. Fortaleza: [s.n.]. 2004. p. 3221-3228.
- SÁ, R. V.; MAIA, L. F. P. G.; FRANÇA, G. B.. **Climatologia do Índice Ultravioleta para as Capitais Brasileiras Utilizando as Séries Históricas (1979-2003)**. Anais XIII CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA. Fortaleza: [s.n.]. 2004.
- SAHAI, Y. et al. Observations of UV-B Radiation During Biomass Burning at Cuiabá, Brazil. **Adv Space Res**, Grã Bretanha, v. 26, p. 1979-1982, 2001.
- SANTOS, F. M. D.; SILVA, F. R. D.; MARINHO, G. S. Estudo Probabilístico do Índice de Radiação Ultravioleta em Natal/RN–Brasil. **Mens Agitat**, 2011.
- SCHERER, D.; KUMAR, R. Genetics of pigmentation in skin cancer — A review. **Mutation Research**, 2010. 141–153.
- SHERMAN, M. H. et al. Vitamin D boosts cancer treatment. **Nature**, setembro 2014. 80–93.

- SIN, C. et al. Compréhension et utilisation de l'indice universel de rayonnement solaire (« indice ultraviolet ») par les dermatologues français métropolitains. **Annales de dermatologie et de vénéréologie**, janeiro 2013. 15 -20.
- SOLOMON, S. et al. On the depletion of Antarctic ozone. **Nature**, p. 755 - 758 , junho 1986.
- TAYLOR, K. E.; STOUFFER, R. J.; MEEHL, G. A. An Overview of CMIP5 and the Experiment Design, 2012. 485-498.
- TENKATE, T. D. Ultraviolet radiation: human exposure and health risks. **JEnviron Health**, p. 9-15, 1998.
- THOMPSON, J. F.; SCOLYER, R. A.; KEFFORD, R. F. Cutaneous melanoma. **Lancet**, fevereiro 2005. 687-791.
- VAN VUUREN, D. P. et al. The representative concentration pathways: an overview. **Climatic change**, 5 agosto 2011. 5 -31.
- VANICEK, K. et al. UV- Index for the Public. **COST-713 Action**, Bruxelas, 1999.
- VAROTSOS, K. V.; GIANNAKOPOULOS, C.; TOMBROU, M. Assessment of the Impacts of Climate Change on European. **Water Air Soil Pollut**, 25 maio 2013. 1-13.
- VENUS, M.; WATERMAN, J.; MCNAB, I. Basic physiology of the skin. **BASIC SCIENCE**, 2011. 471-474.
- WAUGH, D. W. et al. Impacts of climate change on stratospheric ozone recovery. **GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS**, 5 fevereiro 2009. 1-6.
- WCRP. Coupled Model Intercomparison Project – Phase 5. **Special Issue of the CLIVAR Exchanges Newsletter**, maio 2011. 2-48.
- WHO, (. H. O. **Global Solar UV Index: A Practical Guide**. Geneva, Switzerland: [s.n.], 2002.
- WULF, H. C. et al. Skin aging and natural photoprotection. **Micron**, abril 2004. 185–191.
- YOUNG, A. R. Acute effects of UVR on human eyes and skin. **Progress in Biophysics and Molecular Biology**, 28 fevereiro 2006. 80-85.
- ZARATTI, F. et al. Proposal for a modification of the UVI risk scale. **PhoCTOchemical & photobiological sciences**, 06 março 2014. 980 -985.