



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MEIO AMBIENTE**  
**E RECURSOS HÍDRICOS**

**ESTIMATIVAS DA DISTRIBUIÇÃO DE RADIAÇÃO**  
**SOLAR ULTRAVIOLETA RECEBIDA EM**  
**DIFERENTES PARTES DO CORPO**

---

**DISSERTAÇÃO**

**Ivana Riera Pereira Bastos**

**Itajubá, MG,**  
**Brasil**  
**2023**

# **ESTIMATIVAS DA DISTRIBUIÇÃO DE RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA EM DIFERENTES PARTES DO CORPO**

---

**por**

**Ivana Riera Pereira Bastos**

Dissertação (modalidade projeto)  
submetido ao Programa de Pós-  
Graduação em Meio Ambiente e  
Recursos Hídricos, como parte das  
exigências obrigatórias para obtenção do  
título de Mestre.

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

**Itajubá, MG,  
Brasil  
2023**

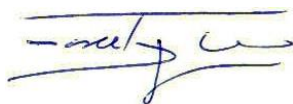
**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MEIO AMBIENTE E**  
**RECURSOS HÍDRICOS**

**IVANA RIÊRA PEREIRA BASTOS**

**ESTIMATIVAS DA DISTRIBUIÇÃO DE RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA**  
**EM DIFERENTES PARTES DO CORPO**

Dissertação aprovada por banca examinadora em 17 de fevereiro de 2023 conferindo ao autor o título de **Mestre em Ciências em Meio Ambiente e Recursos Hídricos**.

**Banca examinadora:**



---

Prof<sup>a</sup> Dr. Marcelo de Paula Corrêa (Orientador)  
Universidade Federal de Itajubá



---

Prof<sup>o</sup> Dr. Alexandre Lima Correia  
Universidade de São Paulo



---

Prof<sup>o</sup> Dr. Enrique Vieira Mattos  
Universidade Federal de Itajubá

**Itajubá, MG,**

**Brasil 2023**

*Dedico essa dissertação aos meus avós,  
Edna e Ivan (sempre)*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço...

Em primeiro lugar, à Deus, pelo sustento e capacitação diária.

Aos meus pais, Junior e Fabiana, pelo apoio e incentivo incondicional. Sem vocês eu jamais chegaria até aqui. Gi e Renan, obrigada pela parceria de sempre, por me aturarem até nos piores dias. Ao meu amor e quase marido, Gabriel, obrigada pelo suporte e por acreditar em mim mesmo quando nem eu acreditava. Você é parte fundamental da minha vida.

Aos meus avós Edna e Ivan (sempre no coração), obrigada pelo orgulho e felicidade que vocês transmitem à cada conquista minha. Meu avô não vai me ver apresentar essa dissertação, mas, com certeza, estaria vibrando neste dia.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Marcelo de Paula Corrêa, o meu muito obrigada pela orientação, por acreditar em mim e me ensinar tantas coisas no meio acadêmico, acompanhando a minha trajetória na Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI).

A “minha pessoa” na UNIFEI: Obrigada, Flávia, por dividir as alegrias, dores e loucuras de mais uma etapa. Os últimos 6 anos não seriam os mesmos se não fosse a nossa parceria.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro através da concessão da bolsa de estudo, a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pelo apoio financeiro aos projetos PVDI197-2021 e PPM-00439-16 que possibilitou a compra dos dosímetros, ao Instituto de Recursos Naturais (IRN) e técnico Xandinho pelo apoio com materiais e disposição durante o experimento e a UNIFEI, com ênfase ao corpo docente do Programa de Pós Graduação em Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela troca e aprendizado durante esses anos.

## RESUMO

BASTOS, Ivana Riera Pereira Bastos. **Estimativas da distribuição de Radiação Ultravioleta em diferentes partes do corpo**. 2023. 70 f. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Instituto de Recursos Naturais, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2023.

A Radiação Ultravioleta (RUV) é responsável por diversos processos físicos, químicos e biológicos, tanto na superfície quanto na atmosfera terrestre. Nos seres humanos, a RUV pode causar benefícios, como a síntese de vitamina D, e malefícios, como queimaduras, envelhecimento precoce e cânceres de pele. Em geral, instrumentos e modelos de transferência radiativa são usados para medir ou estimar a incidência da RUV, mas levam em consideração que a radiação atinge uma superfície horizontal. Por esta razão, não representam de maneira fidedigna a dose acumulada de RUV nas diferentes partes do corpo humano, denominada dose eritêmica (D-UVE). Afinal, as partes de nosso corpo estão em inclinações em relação ao Sol, se fazendo necessária a representação da RUV incidente por meio de um modelo geométrico tridimensional (MGe). Sendo assim, este estudo tem como objetivo geral analisar a variação da incidência de RUV em diferentes partes do corpo considerando diferentes características geográficas e atmosféricas, o tempo de exposição e a posição do indivíduo em relação ao Sol. Para isso, foi instalado um experimento, sob delineamento experimental inteiramente casualizado, visando avaliar a D-UVE incidente nas diferentes partes do corpo de um manequim. Os resultados indicaram interação significativa ( $p \leq 0,05$ ) entre as D-UVE, a orientação no manequim e as posições dos sensores no corpo humano. Mesmo nos meses de inverno, quando a disponibilidade de radiação solar é menor, a D-UVE pode ser suficiente para causar eritema mesmo em peles menos sensíveis, independentemente da orientação do indivíduo. Em paralelo, um MGe, desenvolvido em linguagem Python, foi adaptado para estimar a RUV em superfícies inclinadas, levando em consideração condições de entrada adaptadas às variações geográficas e temporais de qualquer localidade do planeta. Nas primeiras horas do dia, a D-UVE foi mais intensa na orientação leste, na qual o Sol está nascendo e se posicionando em relação ao horizonte. Considerando uma hora de exposição em torno do meio-dia, tem-se que os valores observados com a face voltada para o sul são significativamente maiores do que em relação ao norte, tendo em vista a posição do Sol neste horário. Também, os fluxos de radiação em superfícies inclinadas no ângulo de inclinação da superfície em relação ao plano horizontal ( $\beta$ ) =  $30^\circ$  são mais altos do que nas superfícies verticais, pois, em  $\beta = 90^\circ$ , a componente direta tende a zero, prevalecendo, deste modo, somente a componente difusa. Já na exposição de dia inteiro, observou-se que, mesmo no inverno, há riscos de danos à saúde para indivíduos de todos os fototipos. A partir deste trabalho, será possível simular valores de D-UVE em superfícies inclinadas para localidades em qualquer local do planeta, com ênfase para o Hemisfério Sul, que ainda não havia sido alvo de pesquisas em trabalhos nestas condições. Para trabalhos futuros, sugere-se o aperfeiçoamento de toda metodologia do Modelo Geométrico Adaptado (MGeA), de forma a analisar e compilar as equações semi-empíricas e tratamentos específicos, para evitar resultados generalistas.

**Palavras-chave:** Dose Eritêmica; Saúde Humana; Modelo Geométrico.

## ABSTRACT

BASTOS, Ivana Riera Pereira Bastos. **Estimation of the distribution of Ultraviolet Radiation in different parts of the body.** 2023. 70 p. Master of Science (Master in Environment and Water Resources) - Natural Resources Institute, Federal University of Itajubá, Itajubá, 2023.

Ultraviolet Radiation (UVR) is responsible for several physical, chemical and biological processes, both on the surface and in the Earth's atmosphere. In humans, UVR can cause benefits, such as vitamin D synthesis, and harm, such as burns, premature aging and skin cancer. In general, instruments and radiative transfer models are used to measure or estimate the incidence of UVR, but they take into account that the radiation is reaching a horizontal surface. For this reason, they do not reliably represent the accumulated dose of UVR in different parts of the human body, called erythemic dose (D-UV<sub>E</sub>). After all, the parts of our body are inclined in relation to the Sun, making it necessary to represent the incident UVR through a three-dimensional geometric model (MGe). Therefore, this study has the general objective of analyzing the variation in the incidence of UVR in different parts of the body considering different geographic and atmospheric characteristics, the time of exposure and the individual's position in relation to the Sun. For this, an experiment was installed, under a completely randomized experimental design, aiming to evaluate the D-UV<sub>E</sub> incident on the different parts of the body of a mannequin. The results indicated a significant interaction ( $p \leq 0.05$ ) between the D-UV<sub>E</sub>, the orientation on the dummy and the positions of the sensors on the human body. Even in the winter months, when the availability of solar radiation is lower, D-UV<sub>E</sub> can be enough to cause erythema even in less sensitive skin, regardless of the individual's orientation. In parallel, a MGe, developed in Python, was adapted to estimate the UVR on inclined surfaces, taking into account input conditions adapted to geographic and temporal variations of any location on the planet. In the first hours of the day, the D-UV<sub>E</sub> was more intense in the east orientation, in which the Sun is rising and positioning itself in relation to the horizon. Considering an hour of exposure around noon, the values observed with the face facing south are significantly higher than those observed in relation to the north, considering the position of the Sun at this time. Also, radiation fluxes on inclined surfaces at the angle of inclination of the surface relative to the horizontal plane at  $\beta = 30^\circ$  are higher than on vertical surfaces, since, at  $\beta = 90^\circ$ , the direct component tends to zero, therefore, prevailing only the diffuse component. As for the full-day exposure, it was observed that, even in winter, there are risks of damage to health for individuals of all phototypes. From this research, it will be possible to simulate D-UV<sub>E</sub> values on inclined surfaces for locations anywhere on the planet, with emphasis on South Hemisphere, which had not yet been the subject of research in works under these conditions. For future works, it is suggested to improve the entire methodology of the Adapted Geometric Model (MGeA), in order to analyze and compile the semi-empirical equations and specific treatments, to avoid generalist results.

**Keywords:** Erythemic Dose; Health Human; Geometric Model.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Infográfico sobre câncer de pele não melanoma relacionado ao trabalho. Fonte: <a href="https://www.inca.gov.br/publicacoes/infograficos/cancer-de-pele-nao-melanoma-relacionado-ao-trabalho">https://www.inca.gov.br/publicacoes/infograficos/cancer-de-pele-nao-melanoma-relacionado-ao-trabalho</a> . .....	16
<b>Figura 2:</b> Cards de divulgação da campanha “dezembro laranja”, promovida pela Sociedade Brasileira de Dermatologia. Fonte: <a href="https://www.sbd.org.br/dezembrolaranja/">https://www.sbd.org.br/dezembrolaranja/</a> .....	16
<b>Figura 3:</b> Os efeitos da radiação ultravioleta na pele humana: (a) eritema ou queimadura solar, (b) envelhecimento prematuro da pele (elastose solar/rugas).....	22
<b>Figura 4:</b> Ilustração dos tipos de câncer de pele a) melanoma, b) carcinoma basocelular, c) carcinoma epidermoide. Fonte: <a href="https://www.dermatologia.net/">https://www.dermatologia.net/</a> . .....	22
<b>Figura 5:</b> Disposição geométrica de uma superfície inclinada (representada pelo painel solar) em relação aos ângulos de inclinação ( $\beta$ ) e do azimute ( $\gamma$ ). Fonte: Adaptado de SIE ( <a href="https://siesolucoes.com.br/">https://siesolucoes.com.br/</a> ).....	26
<b>Figura 6:</b> Posição dos dosímetros de UV instalados no corpo do manequim durante o experimento. ....	28
<b>Figura 7:</b> Manequim em exposição na orientação em pé sendo a) vista frontal e b) vista posterior durante o experimento. ....	29
<b>Figura 8:</b> Manequim em exposição na orientação deitado sendo a) vista anterior e b) vista superior durante o experimento. ....	29
<b>Figura 9:</b> Fluxograma resumo do algoritmo adaptado de Salvadori et al. (2019).....	32
<b>Figura 10:</b> Valores dos coeficientes A) índice de claridade ( $kt$ ), B) coeficiente de massa óptica ( $m$ ), C) índice de claridade em relação à UVE ( $kuv$ ) e D) coeficiente de brilho ( $\Delta$ ), todos em relação à componente difusa de RUV (IdAs, em preto). ....	38
<b>Figura 11:</b> Dosímetro em exposição durante o dia de experimento sendo vista a) para direção norte e b) direção sul. ....	40
<b>Figura 12:</b> Fluxograma das condições de entrada utilizadas para validar o aprimoramento do modelo geométrico desenvolvido por Salvadori et al. (2019) (MGeA). As coordenadas geográficas utilizadas para cada cidade encontram-se na tabela 01 do Anexo B.....	41
<b>Figura 13:</b> Localização das dez cidades escolhidas para o estudo. ....	42
<b>Figura 14:</b> Doses eritêmicas acumuladas em diferentes posições do corpo nas orientações a) em pé e b) deitado.....	43
<b>Figura 15:</b> Doses eritêmica acumulada em dez diferentes cidades, em uma superfície horizontal ( $\beta=0^\circ$ ), entre às 6h e 20h no solstício de A) inverno e B) verão. ....	48



**Figura 16:** Doses eritêmicas (D-UVE) acumuladas em superfícies inclinadas ( $\beta= 0^\circ$ , figuras A e B;  $\beta= 30^\circ$ , figuras C e D;  $\beta= 60^\circ$ , figuras E e F; e,  $\beta = 90^\circ$ , figuras G e H) , para diferentes orientações em relação ao sol  $\gamma = -90^\circ$  (barra vertical laranja),  $0^\circ$  (verde),  $90^\circ$  (azul) e  $180^\circ$  (rosa), entre às 6h e 10h, nos solstícios de inverno (coluna esquerda) e verão (coluna direita) em cada hemisfério..... 51

**Figura 17:** Doses eritêmica acumulada, no solstício de inverno, em uma superfície inclinada ( $\beta=30^\circ$ ), entre às 4h e 20h, em A) Paris, B) Tóquio, C) Natal e D) Sydney ..... 54

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Dose Eritêmica (DEM) para fototipo I-VI. ....	24
<b>Tabela 2:</b> Resultados do cálculo para superfícies inclinadas voltadas para a direção norte (21 de junho, meio-dia solar). ....	27
<b>Tabela 3:</b> Variáveis e constantes de entrada no modelo geométrico adaptado (MGeA). ....	31
<b>Tabela 4:</b> Tabela para a seleção dos coeficientes f em função do coeficiente de transparência do céu ( $\epsilon$ ) de acordo com o método de Perez, extraído de Salvadori et al. (2019). ....	36
<b>Tabela 5:</b> Comparação de médias para o D-UVE [SED] acumulado recebido em duas posições nos sensores localizados nas nove partes do corpo em Itajubá, nos meses de julho e agosto de 2021. ....	45
<b>Tabela 6:</b> Resultados do cálculo para superfícies inclinadas voltadas para a direção sul (21 de junho, meio-dia solar). ....	46
<b>Tabela 7:</b> Resultados do cálculo para superfícies inclinadas voltadas para a direção norte (21 de junho, meio-dia solar). ....	47
<b>Tabela 8:</b> Dose Eritêmica (D-UVE, em SED) acumulada durante uma hora de exposição, entre 11h30 e 12h30, no solstício de verão, para superfícies inclinadas com $\beta=30^\circ$ e $\beta=90^\circ$ , com a face voltada para o Sul ( $\gamma = 0^\circ$ ) e Norte ( $\gamma = 180^\circ$ ). ....	52

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

- $I_{erbh}$  – Componente direta de irradiância eritêmica em uma superfície horizontal
- $I_{erdh}$  – Componente difusa de irradiância eritêmica em uma superfície horizontal
- $k_t$  – Índice de claridade
- $k_{UV}$  - Índice de claridade em relação à irradiância eritemica
- $E_{bh}$  – Componente direta da Irradiância Solar Total em uma superfície horizontal
- $E_{dh}$  – Componente difusa da Irradiância Solar Total em uma superfície horizontal
- $I_A$  - Irradiância na superfície inclinada
- $I_{bA}$  – Componente direta da irradiância UV eritêmica em uma superfície inclinada
- $I_{dAg}$  – Componente refletida da irradiância UV eritêmica em uma superfície inclinada
- $I_{dAs}$  – Componente difusa da irradiância UV eritêmica em uma superfície inclinada
- $U_A$  - Energia recebida pela unidade de área
- $c_d$  - Fator de correção de excentricidade da órbita da Terra
- $t_{sa}$  - Tempo solar verdadeiro
- $\gamma_s$  - Ângulo azimute
- $\Delta t$  – Tempo de exposição
- a e b – constantes empíricas
- ANOVA – Análise de Variância
- BIAS – Erro de viés médio
- CIE – Comissão Internacional de Iluminação
- CPNM – Câncer de pele não melanoma
- Critério d - Índice de concordância de Willmott
- DEM – Dose Eritematosa Mínima
- DOY – Dia do ano
- D-UVE – Dose Eritêmica
- Eh - Irradiância solar total (Eh)
- Eh – Irradiância Solar Total em uma superfície horizontal
- EhTOP – Irradiância Solar total no topo da atmosfera
- F1 – Coeficiente empírico de irradiância ao redor do Sol
- F2 – Coeficiente empírico de irradiância em relação ao horizonte
- $F_g$  - Fator empírico de ponderação em relação a superfície inclinada

HN – Hemisfério Norte

HS – Hemisfério Sul

$I_{\lambda}$  - Irradiância Espectral

I<sub>erh</sub> - Irradiância Eritêmica na superfície horizontal

I<sub>erhTOP</sub> – Irradiância UV eritêmicas no topo da atmosfera

INCA – Instituto Nacional de Câncer

Índice c – Índice de desempenho

m – Coeficiente de massa óptica

MAPE – Erro percentual médio absoluto

MGe – Modelo Geométrico

MGeA - Modelo Geométrico Aperfeiçoado

MTR – Modelos de Transferência Radiativa

OMI - Instrumento de Monitoramento de Ozônio da NASA

OMS – Organização Mundial da Saúde

RF <sub>$\lambda$</sub>  - Resposta Fotobiológica Espectral

RQME - Raiz do quadrado médio do erro

RUV - Radiação Ultravioleta

RUV-A – Radiação ultravioleta no intervalo de comprimento de onda entre 315 e 400 nm

RUV-B – Radiação ultravioleta no intervalo de comprimento de onda entre 280 e 315 nm

RUV-C – Radiação ultravioleta no intervalo de comprimento de onda entre 100 e 280 nm

S - Irradiância Biologicamente Ativa

SBD – Sociedade Brasileira de Dermatologia

SBDART - *Santa Barbara DISORT Atmospheric Radiative Transfer*

SED - *Standard Erythema Dose*

SR – Sensoriamento Remoto

TUV - *Tropospheric Ultraviolet and Visible*

UNIFEI – Universidade Federal de Itajubá

UT – Hora do dia

UVE – Irradiância Eritêmica

$\alpha$  - Ângulo de elevação do Sol

$\beta$  - Ângulo de inclinação da superfície em relação ao plano horizontal

$\gamma$  - Ângulo de inclinação da superfície em relação ao azimute

$\Gamma$  - Ângulo em relação a órbita elíptica da Terra em torno do Sol

$\Delta$  - Coeficiente de brilho

$\delta$  - Declinação solar

$\varepsilon$  - Coeficiente de transparência do céu

$\lambda$  - Comprimento de onda

$\rho$  - Albedo

$\omega$  - Ângulo horário

$et$  - Equação do tempo

$\theta$  - Ângulo entre o raio solar incidente (direção do sol) e a reta normal à superfície

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	15
2. OBJETIVOS .....	18
2.1. Objetivo Geral .....	18
2.2. Objetivos Específicos .....	19
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	19
3.1. Radiação Ultravioleta (RUV) e interações .....	19
3.3. Dose Eritêmica (D-UVE) e Dose Eritêmica Mínima (DEM) .....	23
3.4. Modelo Geométrico de Transferência Radiativa .....	25
4. METODOLOGIA .....	28
4.1. Descrição do experimento .....	28
4.2. Modelo Geométrico de Transferência Radiativa .....	30
4.2.1. Validação do Modelo Geométrico de transferência radiativa.....	38
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	42
5.1. Incidência de RUV em diferentes partes do corpo e diferentes orientações .....	42
5.2. Verificação e Validação estatística da adaptação do modelo geométrico (MGeA) .....	45
6. CONCLUSÕES .....	55
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	57

## 1. INTRODUÇÃO

O Sol é a principal fonte de energia para o planeta Terra e os seres humanos estão expostos à radiação solar em suas atividades cotidianas. Dentre os tipos de radiação emitidos pelo Sol, a radiação ultravioleta (RUV) é responsável por diferentes efeitos fotoquímicos e fotobiológicos que ocorrem na atmosfera e na superfície da Terra (YAMASOE; CORRÊA, 2016). A exposição do ser humano à RUV vem sendo discutida em âmbito multidisciplinar, uma vez que a RUV é um dos riscos de saúde ambiental mais comuns que causam efeitos tóxicos na maioria dos organismos vivos (YU; LEE, 2017). Nos seres humanos, a exposição excessiva à RUV está relacionada, principalmente, às queimaduras, envelhecimento precoce, cânceres de pele, dentre outras enfermidades. Por essa razão, a exposição cotidiana ao Sol têm sido preocupação recorrente da Organização Mundial da Saúde (OMS) e de Sociedades Médicas, como a Sociedade Brasileira de Dermatologia (SBD).

A demasiada exposição ao Sol, sem a proteção adequada, pode provocar danos à saúde. Por essa razão, sociedades médicas e o poder público têm realizado campanhas de conscientização. Por exemplo, o Instituto Nacional de Câncer (INCA) promove campanhas que alertam sobre o risco à exposição prolongada e repetida à RUV durante a jornada de trabalho (figura 1) (INCA, 2022). Já a SBD, instituiu a campanha anual “dezembro laranja”, a fim de conscientizar a população acerca do risco de câncer de pele associada à exposição à RUV acentuada, principalmente, no verão (<https://www.sbd.org.br/dezembrolaranja/> – figura 2).



**Figura 1:** Infográfico sobre câncer de pele não melanoma relacionado ao trabalho. Fonte: <https://www.inca.gov.br/publicacoes/infograficos/cancer-de-pele-nao-melanoma-relacionado-ao-trabalho>.



**Figura 2:** Cards de divulgação da campanha “dezembro laranja”, promovida pela Sociedade Brasileira de Dermatologia. Fonte: <https://www.sbd.org.br/dezembrolaranja/>.

A incidência da RUV em diferentes partes do corpo humano não ocorre de maneira uniforme durante a exposição (SALVADORI et al., 2019; RYDZ et al., 2020), pois, o corpo humano é uma estrutura irregular, tridimensional e possui diferentes inclinações em relação ao Sol. Esta é uma preocupação relevante, pois a RUV é geralmente medida e calculada para superfícies horizontais e, portanto, a incidência em superfícies inclinadas pode ser subestimada ou superestimada para determinadas posições (HOEPPE et al., 2004).

Em superfícies horizontais, as medições de RUV costumam ser feitas por instrumentos meteorológicos em superfície, bem como através de sensoriamento remoto (SR). Entretanto, os instrumentos de superfície têm alto custo e difícil manutenção, o que faz que os mesmos sejam escassos no Brasil (SOUZA et al., 2017; MONTEIRO e MARTINS, 2019), enquanto as medidas realizadas por SR possuem baixa resolução espacial, prejudicando a acurácia das



medições pontuais necessárias para estudos da natureza da RUV (SOUZA ECHER et al., 2006).

Uma alternativa é realizar medições de RUV com dosímetros individuais, mais modernos, baratos e de manutenção mais simples, tal como realizado em Gronchil e Caldas (2013), Moldovan (2019), Modenese (2020) e Corrêa et al. (2021). Tais instrumentos permitem medições em superfícies em ângulos distintos e que consideram diferentes partes do corpo (GUGLIERMETTI, 2019). Permitem, também, medidas durante ações do cotidiano, como por exemplo: caminhadas, exposições e pedaladas ao ar livre (VECCHI et al., 2019), trabalhos que são expostos diretamente à RUV no meio rural (SIANI et al., 2011), construções civis (SERRANO et al., 2009) e, atividades de pesca (MODENESE et al., 2019).

Como se trata de tecnologia relativamente recente, instrumentos portáteis podem apresentar problemas de calibração, precisão e transmissão de dados, bem como alteração nos dados por uso incorreto (MOLDOVAN, 2019). Para contornar tais deficiências, ou a escassez de medidas realizadas por instrumentos convencionais ou SR, modelos de transferência radiativas (MTR) são amplamente utilizados (MADRONICH, 1992; RICCHIAZZI et al., 1998; MAYER e KYLLING, 2005). Tais modelos utilizam métodos aproximados, analíticos ou estatísticos que se baseiam da Equação de Transferência Radiativa (ETR) para inferir os fluxos de radiação solar e terrestre (LIOU, 2002). No caso da inferência da RUV em superfícies inclinadas, foram desenvolvidos algoritmos matemáticos (BACKES et al., 2019; SCHMALWIESER et al., 2023) ou modelos geométricos (MGe) em três dimensões (SALVADORI et al., 2019) que, associados a modelos tradicionais de transferência radiativa, possuem condição de avaliar fluxos de radiação em diferentes partes do corpo humano. Outro uso desses modelos é em análises de energia solar renovável (KHATIB et al., 2012), a fim de analisar diferentes parâmetros de radiação solar, ângulo de inclinação e, também, o “ângulo ótimo” de inclinação dos painéis solares, a fim de obter o maior potencial energético em cada localidade (HAFEZ et al., 2017; JAIN e LALWANI, 2017).

Além das dificuldades e particularidades supracitadas, a avaliação da RUV para estudos de saúde deve levar em consideração as respostas fotobiológicas provocadas por este tipo de radiação. Portanto, o MGe deve levar em consideração todas as diferentes particularidades apresentadas e permitir a integração desses fluxos radiativos no tempo, de modo que possibilite avaliar as doses de RUV acumuladas nas diversas partes do corpo humano, denominadas doses eritêmicas (D-UVE).

Estudos sobre incidência de RUV em diferentes partes do corpo são escassos no hemisfério Sul (HS), os poucos existentes foram realizados por Ruales et al. (2022) e Corrêa et al. (2021). Ruales et al. (2022) avaliaram a exposição à RUV de trabalhadores ao ar livre na

Colômbia, porém desconsiderando a incidência nas diferentes partes do corpo humano, tratando o corpo humano como uma superfície horizontal em relação ao Sol. Já Corrêa et al. (2021) apresenta uma breve análise considerando quatro ângulos de inclinação da superfície em relação ao sensor de referência, localizado na parte superior de um capacete (topo da cabeça), ressaltando que medidas em superfícies inclinadas são próximas ou até maiores que as registradas no sensor de referência.

Considerando o Hemisfério Norte (HN), trabalhos como Backes et al. (2019), Salvadori et al. (2019) e Schmalwieser et al. (2023), consideram diferentes orientações para representar diferentes partes do corpo humano. Porém, os algoritmos utilizados foram testados apenas para aquelas regiões e condições atmosféricas específicas, não sendo validados para diferentes localidades e condições de entrada.

Nesta perspectiva, o MGe desenvolvido por Salvadori et al. (2019) foi objeto de estudo neste trabalho, uma vez que se trata de um modelo de simples implementação computacional. Porém, suas aplicações são geograficamente limitadas a cidades da Itália e arredores. Em virtude dessa simplicidade, este estudo propôs o aperfeiçoamento deste MGe para que o mesmo possa ser utilizado em atividades operacionais e para qualquer localidade e condição atmosférica.

Tendo em vista a escassez de estudos acerca deste assunto no HS e as deficiências encontradas no MGe, esse trabalho visa responder as seguintes questões: i) Como se distribui a incidência da irradiância eritêmica (UVE) nas diferentes partes do corpo humano, em condições de alta disponibilidade de radiação solar?; ii) Qual é o impacto nas doses acumuladas (D-UVE) nessas diferentes partes do corpo considerando a disponibilidade de radiação em superfícies inclinadas?; e, iii) Quais as adaptações necessárias para que o MGe seja suficientemente acurado para realizar medições em superfícies com diferentes orientações em qualquer localidade da Terra?

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo Geral**

Analisar a variação da incidência de UVE em diferentes partes do corpo considerando características geográficas e atmosféricas distintas, o tempo de exposição e a posição do indivíduo em relação ao Sol.

## 2.2. Objetivos Específicos

- Adaptar um MGe para possibilitar o uso em rotinas operacionais usando qualquer posição geográfica e diferentes escalas de tempo;
- Analisar os impactos da distribuição irregular da UVE sobre a saúde humana, sob condições de alta disponibilidade de radiação solar, em diferentes exposições e cidades do mundo.

## 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 3.1. Radiação Ultravioleta (RUV) e interações

A RUV é definida como a radiação eletromagnética compreendida no intervalo de comprimentos de onda ( $\lambda$ ) entre 100 e 400 nm ( $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$ ) (YAMASOE; CORRÊA, 2016). De acordo com a Comissão Internacional de Iluminação (CIE), a RUV é subdividida em três bandas do espectro eletromagnéticos: RUV-C (100-280 nm), RUV-B (280-315 nm) e RUV-A (315-400 nm) (ICNIRP, 2004). Estas três bandas possuem características distintas e são responsáveis por efeitos fotobiológicos e fotoquímicos importantes na atmosfera e em superfície (DIFFEY, 2002).

A RUV total pode ser dividida em três componentes: direta, difusa e refletida. A componente direta de RUV é fornecida a partir da posição relativa em relação ao Sol. A difusa, por sua vez, é fornecida a partir da atenuação pela absorção e espalhamento pela atmosfera. No espalhamento, a energia proveniente da RUV em uma direção é espalhada para outras direções, sem alteração de seu comprimento de onda, resultando na produção de radiação difusa (CORRÊA, 2015). A componente de RUV refletida está associada ao solo, que é a principal fonte de reflexão de RUV (SALVADORI et al., 2019).

Os fatores ambientais que mais influenciam a distribuição espectral e a quantidade de RUV que atinge a superfície são a composição atmosférica, a altitude, a cobertura de nuvens e o albedo da superfície (ICNIRP, 2010; CORRÊA, 2015). A composição atmosférica tem papel importante na atenuação de RUV, uma vez que, os gases, moléculas e partículas presentes na atmosfera atuam nos fenômenos de absorção e espalhamento de radiação (CORRÊA, 2015). A absorção de RUV ocorre através da interação de RUV com o ozônio estratosférico, que atua como um filtro ao absorver RUV de comprimentos de onda menores que 300 nm (HOLLÓSY, 2002; YAMAMOTO et al., 2021). Por sua vez, no fenômeno de espalhamento molecular Rayleigh, a RUV é dispersada pelos componentes atmosféricos que

são partículas muito menores que o comprimento de onda da radiação (KIRCHHOFF et al., 2000).

Na atmosfera, RUV-C é completamente absorvida pelo oxigênio e ozônio presentes nas camadas superiores e não atinge a superfície terrestre (YAMASOE; CORRÊA, 2016). Dada sua ação germicida e bactericida (ARAUJO; SOUZA, 2008), a RUV-C pode ser usada artificialmente para desinfecção de ar e superfícies (MEYERS et al., 2017), inclusive, envolvendo ambientes infectados pelo vírus Sars-CoV-2 (MICHELINI et al., 2022). Ademais, também é utilizada como opção eficiente e ecológica para processamento/conservação de alimentos (SINGH et al., 2021).

Por sua vez, a RUV-B é fortemente absorvida pelo ozônio e oxigênio presentes na atmosfera (OMS, 2003), e, espalhada por moléculas e aerossóis, de modo que cerca de 1 a 5% do total de R-UVB emitido pelo Sol atinge a superfície e o ser humano. Entretanto, ainda que em quantidades tênues, a quantidade de R-UVB que atinge a superfície é suficiente para causar efeitos fotobiológicos mais significativos dos que os causados pela RUV-A. Esta última é pouco absorvida pelos gases atmosféricos, atingindo a superfície em maiores quantidades. Devido à dependência espectral dos fenômenos de absorção e espalhamento, em um dia de céu claro (sem nuvens), no início e final do dia, praticamente toda RUV em superfície é composta por RUV-A (CORRÊA, 2015; YAMASOE; CORRÊA, 2016).

As nuvens também são responsáveis por espalhar a RUV. Como são formadas por pequenas gotículas de água ou cristais de gelo, a RUV pode ser espalhada ao atravessá-las, resultando, na extinção ou diminuição do feixe de radiação, o que caracteriza as nuvens como potenciais atenuadoras de RUV (CALBÓ et al., 2005). Entretanto, alguns estudos tratam do efeito “realce das nuvens”, situações nas quais são observadas maiores quantidades de RUV em superfície, do que em condições de céu claro, quando há presença de determinados tipos de nuvens, como os *cumulus* de bom tempo ou *cirrus*. Esse fenômeno pode ocorrer devido ao intenso espalhamento no sentido de propagação do feixe solar (SABBURG; PARISI, 2006).

Em relação à altitude, espera-se um aumento linear da componente direta de RUV em locais mais altos, devido a atmosfera ser mais rarefeita, diminuindo, assim, a atenuação de radiação por espalhamento (KIRCHHOFF et al., 2000).

Por sua vez, em relação ao albedo, as diferenças só são consideradas significativas em superfícies com neve, que possuem maior refletividade e, desta forma, influenciam a incidência de RUV (TURNER e PARISI, 2018).

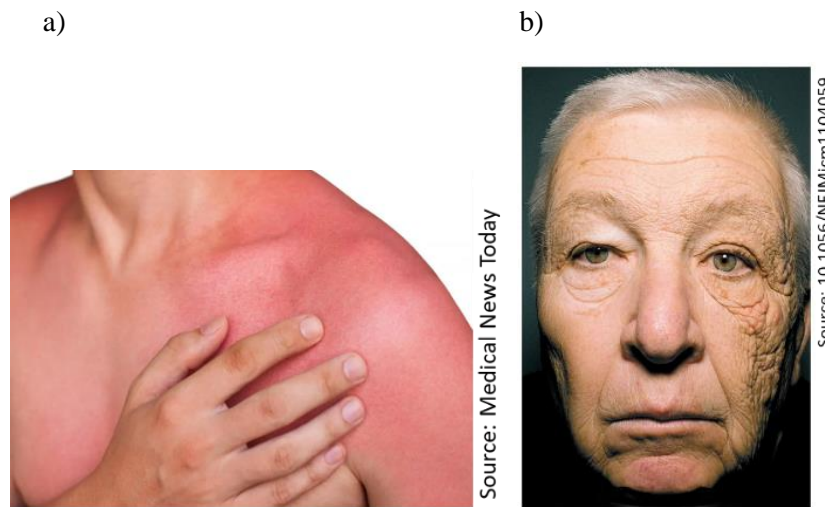
### **3.2. Efeitos da RUV à partir das reações fotoquímicas e fotobiológicas**

Os efeitos fotoquímicos decorrem, em geral, da absorção de RUV por moléculas, átomos, radicais livres ou íons presentes na atmosfera (BAO et al. 2018). Como por exemplo, a formação e destruição da camada de ozônio, o *smog* fotoquímico, o ozônio na troposfera e a chuva ácida (YAMAMOTO et al., 2021), uma vez que a RUV age como catalisador de reações químicas e influenciando de forma marcante os mecanismos de aquecimento em regiões mais elevadas da atmosfera (CORRÊA, 2015). Com a depleção da camada de ozônio, maior quantidade de RUV atinge a superfície (NORVAL et al., 2011), acentuando os efeitos sobre a saúde humana. Em relação ao *smog* fotoquímico e à chuva ácida, a poluição do ar está diretamente associada à problemas respiratórios e de pele (XU et al., 2020).

Em relação aos efeitos fotobiológicos, a RUV está associada aos benefícios e malefícios à saúde humana. Esses efeitos dependem de fatores extrínsecos, tais como a quantidade de horas e do modo como ocorre a exposição ao Sol; e, de fatores intrínsecos, tais como a cor da pele, cabelos e olhos, alimentação e saúde do indivíduo (HOEL e GRUJII, 2018; SCHALKA et al., 2019; CADET et al., 2020).

Dentre os efeitos fotobiológicos, os principais efeitos deletérios da exposição à RUV são o eritema (avermelhamento da pele, figura 3a), envelhecimento prematuro da pele (figura 3b, D’ORAZIO et al., 2013), doenças nos olhos, como, por exemplo, catarata (WALSH, 2009), supressão no sistema imunológico (DUTHIE et al., 1999) e, os cânceres de pele, consequência mais grave da exposição excessiva à RUV.

Há duas formas principais de câncer de pele, o melanoma cutâneo (figura 4a) e o câncer de pele não-melanoma - CPNM (figuras 4b e 4c, ZHANG et al., 2012). O primeiro, é o mais grave e tem origem nos melanócitos, células produtoras de melanina, substância que determina a cor da pele. O CPNM, por sua vez, é o tipo mais frequente, apresentando tumores diferentes, sendo os mais comuns, o carcinoma basocelular (mais prevalente e menos agressivo, figura 4b) e o carcinoma epidermoide (figura 4c).



**Figura 3:** Os efeitos da radiação ultravioleta na pele humana: (a) eritema ou queimadura solar, (b) envelhecimento prematuro da pele (elastose solar/rugas).



**Figura 4:** Ilustração dos tipos de câncer de pele a) melanoma, b) carcinoma basocelular, c) carcinoma epidermoide. Fonte: <https://www.dermatologia.net/>.

No Brasil, o câncer de pele é o tipo mais comum entre os novos casos de cânceres diagnosticados anualmente (8.450 novos casos do tipo melanoma e 176.940 não-melanoma), correspondendo a aproximadamente 30% de todas as neoplasias registradas (INCA, 2020). A taxa de mortalidade, por sua vez, encontra-se em 22,8% e 1,5% para o melanoma e CPNM, respectivamente (SIM, 2020).

O CPNM possui altos índices de cura, caso diagnosticado e tratado de maneira precoce. Entretanto, ainda que esteja atrelado à baixa mortalidade, pode causar mutilações bastante expressivas (INCA, 2021). O melanoma, por sua vez, embora represente apenas 3% das neoplasias malignas de pele no país, pode aparecer em qualquer parte do corpo, na pele ou mucosas, na forma de manchas, pintas ou sinais. Nos indivíduos de pele negra, ele é mais comum nas áreas claras, como palmas das mãos e plantas dos pés. Em geral, o melanoma é uma doença muito grave e com alto potencial de metástase para outros órgãos (INCA, 2021), e a elevada exposição ao Sol e queimaduras solares na infância aumentam o risco de melanoma na idade adulta (MAHÉ et al., 2011).

Por outro lado, a exposição moderada ao Sol induz a produção de vitamina D, responsável pela absorção de cálcio e fosfato para a mineralização do esqueleto, relevantes na prevenção de osteoporose, hipertensão, esclerose múltipla, câncer de cólon, próstata, mama, ovário e diabetes tipo I (HOLICK, 2003; SARAIVA et al., 2005; HOLICK, 2016). A fotossíntese da vitamina D está associada a fatores endógenos, tais como, cor da pele, idade, alimentação, pré-disposição genética, e, também, a fatores exógenos, como a latitude, hora do dia, a estação do ano e das concentrações de ozônio atmosférico e poluentes (MAEDA et al., 2013).

Para a maior parte da população, a exposição solar comedida e o uso de suplementos fornecem quantidades adequadas desta vitamina (HOLICK, 2005). Uma exposição “pequena e frequente”, de aproximadamente 10 minutos diários, sem o uso de proteção solar, entre as 9h e 15h (HOEL et al., 2016; HOLICK et al., 2016), é sugerida para produzir níveis de vitamina D naturalmente recomendados, sendo essencial para a saúde esquelética (RELIGI et al., 2019).

### 3.3. Dose Eritêmica (D-UVE) e Dose Eritêmica Mínima (DEM)

Os efeitos da radiação eletromagnética nos sistemas biológicos dependem do comprimento de onda da radiação incidente. Isto é, cada comprimento de onda da RUV exerce uma resposta fotobiológica espectral ( $RF_{\lambda}$ ) distinta.

O termo irradiância é utilizado para descrever o fluxo de radiação que atinge uma superfície, sendo definida como o quociente entre a potência incidente sobre um elemento de superfície e sua área (YAMASOE; CORRÊA, 2016). A irradiância monocromática, isto é, relacionada a um determinado  $\lambda$ , é definida como irradiância espectral ( $I_{\lambda}$ ).  $I_{\lambda}$  pode ser ponderada por uma  $RF_{\lambda}$  e, então, passa a ser denominada irradiância biologicamente ativa ( $S$ ).  $S$  é representada matematicamente pela integral do produto entre  $I_{\lambda}$  e uma determinada função  $RF_{\lambda}$  (equação 1).

$$S = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{\lambda} RF_{\lambda} d\lambda \quad [Wm^{-2}] \quad (1)$$

$S$  pode estar associada a diferentes efeitos fotobiológicos, tais como a síntese de vitamina D ou a sensibilidade ao eritema. No caso do eritema,  $RF_{\lambda}$  é a resposta fotobiológica para tal efeito e os limites da integral na equação 1, são  $\lambda_1 = 280$  nm e  $\lambda_2 = 400$  nm. Para efeitos didáticos, neste caso,  $S$  é denominado UVE e representa o avermelhamento da pele no caso da exposição a esse tipo de radiação (MCKINLAY; DIFFEY, 1987). A equação 2 fornece uma

aproximação matemática da  $RF_\lambda$  para o eritema, permitindo o cálculo aproximado da integral descrita na equação 1, isto é:  $S = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_\lambda RF_\lambda d\lambda \approx \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_\lambda RF_\lambda$ .

$$\left. \begin{aligned} RF_\lambda &= 1, & \text{para } \lambda \leq 298 \text{ nm} \\ RF_\lambda &= 10^{0,094(298-\lambda)}, & \text{para } 298 < \lambda < 328 \text{ nm} \\ RF_\lambda &= 10^{0,015(140-\lambda)}, & \text{para } 329 \leq \lambda < 400 \text{ nm} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

A dose eritêmica (D-UVE, equação 3) é dada pela integração da UVE em um determinado intervalo de tempo de exposição ao Sol (DIFFEY, 1991). Isto é, D-UVE representa a quantidade de energia acumulada durante a exposição ao Sol (MADRONICH, 1993):

$$D\text{-UVE} = \int_{\Delta t} UVE dt \quad [J * m^{-2}] \quad (3)$$

Os valores de D-UVE acumulados são representados por uma escala adimensional, denominada *standard erythema dose* (SED) (CIE, 1997). A unidade SED é reservada para estudos observacionais em humanos e outros animais. A CIE propõe que a SED seja usada como medida padronizada de D-UVE, onde 1 SED equivale à exposição radiante eritêmica de  $D\text{-UVE} = 100 \text{ Jm}^{-2}$ .

A ocorrência de eritema em indivíduos com diferentes tipos (ou tonalidades) de pele é estimada por meio da dose eritematosa mínima (DEM) (Tabela 1). Enquanto o SED é uma medida padrão para fluxos de UVE, a DEM representa a D-UVE necessária para que ocorra o eritema (avermelhamento da pele), a depender do indivíduo, após 24 h da exposição ao Sol (FITZPATRICK, 1988). A DEM está associada à sensibilidade da pele relacionada a seis fototipos (I a VI). Os indivíduos mais sensíveis, isto é, de fototipos mais baixos, têm as cores natural da pele, dos olhos e dos cabelos mais claras. Estas pessoas são geralmente mais sensíveis à RUV e necessitam de menores DEM para desenvolvimento do eritema (YOUNG, 2006). Em geral, tais indivíduos também apresentam maior predisposição ao desenvolvimento de doenças, como o câncer de pele, em relação aos indivíduos com peles naturais em tons mais escuros.

**Tabela 1:** Dose Eritêmica (DEM) para fototipo I-VI.

Tipo de pele	Fototipo de pele	DEM [SED]
Baixa melanina	I	2,0-3,0



	II	2,5-3,5
Média melanina	III	3,0-5,0
	IV	4,5-6,0
Alta melanina	V	6,0-10,0
	VI	10,0-20,0

Fonte: Adaptado de Corrêa e Pires, 2013.

### 3.4. Modelo Geométrico de Transferência Radiativa

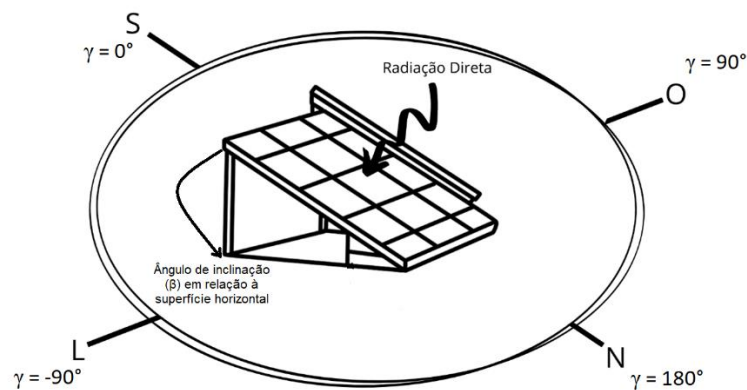
Os MTR são usados para calcular intensidades dos fluxos de radiação solar e terrestre, direta, difusa e refletida. Em geral, os MTR consideram a RUV que atinge um plano horizontal, sem considerar uma superfície inclinada (SALVADORI et al., 2019). Entretanto, como esse campo difuso não é isotrópico, há variações devido à proximidade ao Sol e horizonte, direção normal a do Sol e outras irregularidades, tornando, assim, esta suposição simplificada e irrealista, introduzindo erros significativos ao considerar a energia incidente em superfícies com declive (TEMPS; COULSON, 1977).

Considerando que o corpo humano possui diferentes inclinações e orientações em relação ao Sol, a exposição individual à RUV está relacionada tanto com a distribuição de radiação difusa e refletida, quanto com a postura corporal, duração da exposição, fototipo e hábitos de proteção solar (RELIGI et al., 2016). Por esta razão, os fluxos de radiação calculados por um MTR podem não se adequar à real incidência em determinada parte do corpo (SALVADORI et al., 2019).

Por sua vez, devido à metodologia proposta pelo(s) MGe(s) e a posição da superfície investigada, é possível avaliar a exposição de várias partes do corpo calculando a irradiância UV medida em superfícies horizontais e em uma superfície inclinada correspondente à inclinação de determinada parte do corpo (VERNEZ et al., 2011; YU et al., 2016), a partir do ângulo de inclinação da superfície e, também, ângulos zênite e azimute solar (GAO et al., 2002).

Considerando os fatores ambientais supracitados, o MGe desenvolvido por Salvadori et al. (2019) possui um algoritmo para calcular a D-UVE em superfícies inclinadas. A exposição de uma superfície à RUV é calculada a partir das componentes direta, difusa e refletida de radiação. Neste MGe, o plano tridimensional é utilizado para obter a melhor representação do ângulo de inclinação da superfície em relação ao plano horizontal ( $\beta$ ) e do azimute ( $\gamma$ ). Este último tem

orientação a partir da posição sul ( $\gamma = 0^\circ$ ) do plano considerado, sendo  $\gamma = -90^\circ$ ,  $\gamma = 0^\circ$ ,  $\gamma = 90^\circ$  e  $\gamma = 180^\circ$  as orientações para leste, oeste e norte, respectivamente (Figura 5). A relação entre esses ângulos implica em maior ou menor exposição aos raios solares, fazendo com que a incidência de RUV varie sobre a superfície em questão. Vale ressaltar que a relação entre os ângulos  $\beta$  e  $\gamma$  depende, inclusive, da localização e época do ano. No verão, em locais nublados, o feixe de radiação difusa é predominante, de modo que a energia interceptada é virtualmente independente do azimute da superfície se a inclinação for pequena (GOPINATHAN et al., 2005).



**Figura 5:** Disposição geométrica de uma superfície inclinada (representada pelo painel solar) em relação aos ângulos de inclinação ( $\beta$ ) e do azimute ( $\gamma$ ). Fonte: Adaptado de SIE (<https://siesolucoes.com.br/>).

Os primeiros testes numéricos no estudo de Salvadori et al. (2019) foram realizados para o solstício de verão europeu (21 de junho), na localização de Pisa ( $43,72^\circ$  N,  $10,39^\circ$  E, 4 metros), com a principal parametrização dada por: ângulo horário ( $\omega$ ) =  $0^\circ$ , albedo ( $\rho$ ) = 0,011, UVE na superfície ( $I_{erh}$ ) =  $0,214 \text{ W/m}^2$ , declinação solar ( $\delta$ ) =  $23,45^\circ$ , ângulo zenital ( $\theta_z$ ) =  $20,27^\circ$ , irradiância solar total ( $E_h$ ) =  $931,6 \text{ W/m}^2$ . Ao considerar os valores de  $I_{erh}$  e  $E_h$  constantes, as variações nestes valores em diferentes horários, locais e em relação à composição atmosférica (conteúdo de ozônio, por exemplo), são ignoradas, limitando o algoritmo à condições padrões da atmosfera. Além disso, é necessário ponderar estes valores de irradiância pelo fator de correção de excentricidade da órbita da Terra ( $c_d$ ) considerando a distância média Terra-Sol, outro valor padrão que não considera as especificidades citadas acima.

Para conferir o funcionamento do modelo em relação a qualquer localidade da Terra, foi testado sua aplicabilidade a cidades localizadas no HS, entretanto, foram encontrados resultados negativos para D-UVE. Outro problema encontrado foi a limitação quanto à variação do  $\omega$ , uma vez que a variação deste parâmetro também resultou em valores de D-UVE negativos ou incoerentes com o esperado.

Na Tabela 2 encontram-se os valores da componente direta ( $I_{erdh}$ ) e difusa ( $I_{erbh}$ ) da irradiância eritêmica em uma superfície horizontal, componente refletida ( $I_{dAg}$ ), difusa ( $I_{dAs}$ ) e direta ( $I_{bA}$ ) da irradiância eritêmica em uma superfície inclinada, irradiância eritêmica em uma superfície inclinada ( $IA$ ) e dose eritêmica em uma superfície inclinada ( $UA$ ). Além do citado anteriormente, mais uma incoerência é observada nos resultados obtidos por Salvadori et al. (2019) na relação entre o ângulo  $\beta$  e a D-UVB (tabela 2). Quando  $\beta$  tende a  $90^\circ$ , é esperado que haja diminuição da RUV incidente, uma vez que, próximo do meio-dia solar, os valores máximos de D-UVB são registrados próximo ao valor do ângulo solar zenital, se a superfície estiver orientada na direção do Sol. Deste modo, à medida que  $\beta$  seja diferente desse valor, a tendência é que a D-UVB observada diminua, o que não ocorre nas simulações realizadas.

**Tabela 2:** Resultados do cálculo para superfícies inclinadas voltadas para a direção norte (21 de junho, meio-dia solar).

Ângulo ( $\beta$ )	$15^\circ$	$30^\circ$	$45^\circ$	$60^\circ$	$75^\circ$	$90^\circ$
$I_{erdh}$	0,158	0,158	0,158	0,158	0,158	0,158
$I_{erbh}$	0,056	0,056	0,056	0,056	0,056	0,056
$I_{dAg}$	2,31E-03	2,20E-03	2,01E-03	1,77E-03	1,48E-03	1,02E-03
$I_{dAs}$	0,116	0,125	0,134	0,143	0,152	0,159
$\cos \theta$	-0,996	-0,986	-0,908	-0,769	-0,577	-0,346
$I_{bA}$	0	0	0	0	0	0
$IA$	0,119	0,127	0,136	0,145	0,153	0,160
$UA$	428	457	490	522	551	576
MGe [SED]	4,3	4,6	4,9	5,2	5,5	5,8

Também, para realizar testes numéricos para outras cidades da Itália, foram alterados apenas os valores do dia do ano, latitude, longitude, conteúdo total de ozônio (TOC), albedo e  $E_h$ . As demais variáveis foram consideradas constantes, ainda que exista variações nos demais valores de entrada nas diferentes situações. Além disso, o MGe proposto por Salvadori et al. (2019) é fornecido por meio de uma planilha do Microsoft Excel, o que acaba sendo desvantajoso e impeditivo para que o MGe seja utilizado de forma operacional.

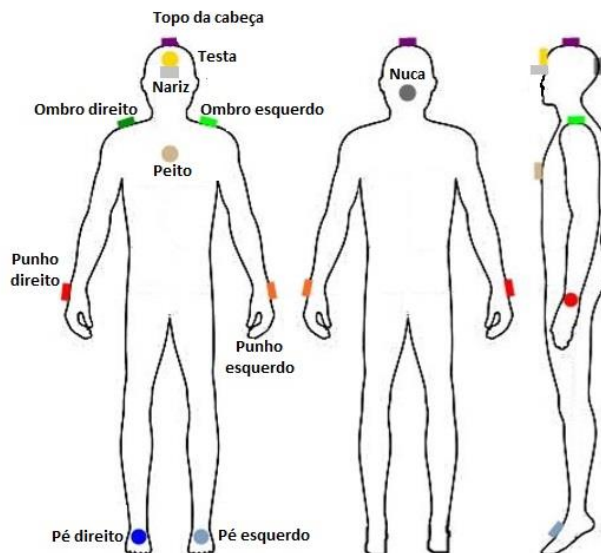
Pelas razões apresentadas, entende-se a necessidade de aperfeiçoar o MGe a fim de torna-lo operacional, em código aberto, que abranja toda e qualquer região do globo e que possua condições de entradas realistas, conforme a localização geográfica e condição atmosférica da situação estudada.

## 4. METODOLOGIA

### 4.1. Descrição do experimento

O experimento de campo consistiu de coletas de dados de UVE medidas em diferentes partes do corpo humano por meio de instrumentos instalados em um manequim (Figura 6). A coleta foi realizada no campus da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), situada na cidade de Itajubá, MG (-22,50°, -45,45°, 850 metros de altitude). O objetivo deste experimento foi coletar dados “reais” de UVE para estimar a D-UVE em diferentes partes do corpo humano em uma localidade no HS no inverno.

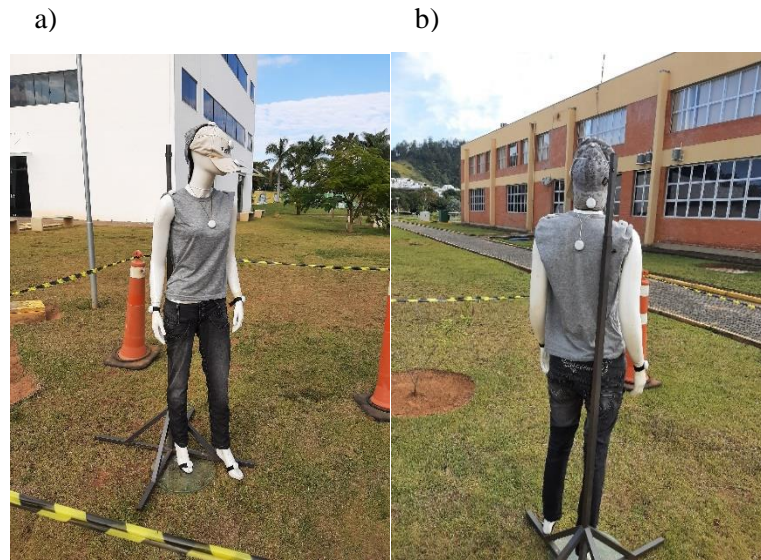
Para tanto, foi considerado um delineamento experimental inteiramente casualizado (9x2), considerando sensores instalados em diferentes posições (fator A) e inclinações do manequim (fator B). Para partes simétricas do corpo, por exemplo, ombros direito e esquerdo, considerou-se a média do valor observado nos dois lados, de forma que foram considerados nove níveis do fator A (1 = topo da cabeça, 2 = nuca, 3 = testa, 4 = nariz, 5 = ombros, 6 = peito, 7 = costas, 8 = punhos, 9 = pés) e dois níveis do fator B (1 = em pé e 2 = deitado).



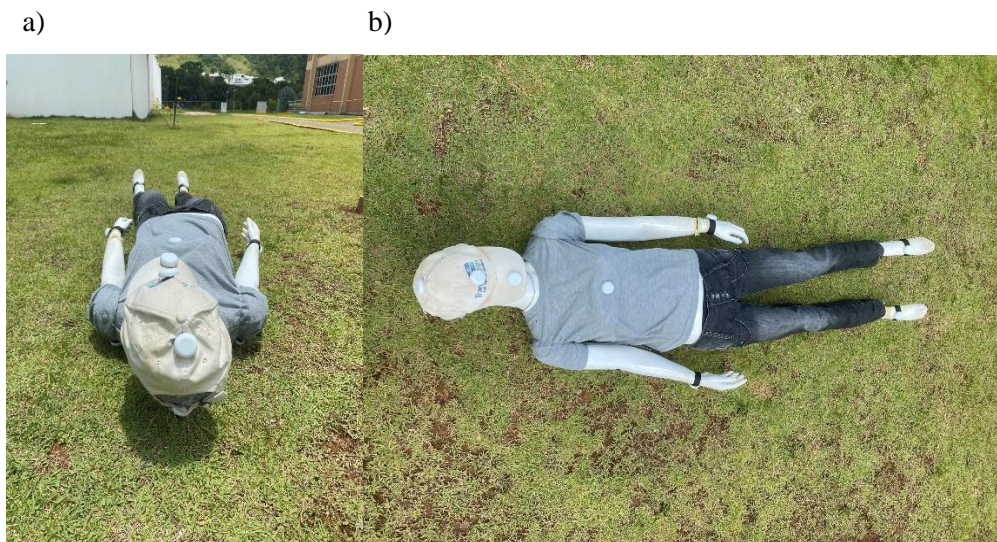
**Figura 6:** Posição dos dosímetros de UV instalados no corpo do manequim durante o experimento.

O manequim ficou exposto das 10h às 16h (hora local), por quatro dias em cada posição, durante os meses de junho e julho de 2021. O manequim utilizado tem altura aproximada de 1,70m, é feito de plástico e possui cor branca. Para evitar reflexão excessiva de radiação, foi vestido com roupas comuns durante todo experimento (blusa cinza, calça jeans, boné bege). O manequim na orientação em pé durante a atividade experimental encontra-se na figura 7, sendo

vista frontal (figura 7a) e vista posterior (figura 7b) e na orientação deitado encontra-se na figura 9, sendo vista anterior (figura 8a) e vista superior (figura 8b).



**Figura 7:** Manequim em exposição na orientação em pé sendo a) vista frontal e b) vista posterior durante o experimento.



**Figura 8:** Manequim em exposição na orientação deitado sendo a) vista anterior e b) vista superior durante o experimento.

O dosímetro (<http://scienterra.com/>) é um sensor constituído de uma fotocélula que absorve os fótons de RUV e converte essa energia em pulsos elétricos (*counts*). Esses *counts* são convertidos em UVE ( $\text{W}/\text{m}^2$ ), através de uma relação matemática que utiliza coeficientes de calibração definidos pela UVE estimada pelo modelo de transferência radiativa

*Tropospheric Ultraviolet and Visible (TUV)*, uma vez que as medições são realizadas em dias de céu claro.

Para analisar a influência dos fatores de exposição (A e B), os valores de D-UV<sub>E</sub> foram submetidos à análise de variância (ANOVA) em esquema bifatorial (9 x 2) para avaliar o efeito das fontes de variação: posições dos sensores no manequim e inclinação do manequim durante a exposição.

Os valores de D-UV<sub>E</sub> foram submetidos ao teste de normalidade Shapiro-Wilk ( $\alpha=0,05$ ), seguida da comparação de médias pelo teste Scott-Knott ( $\alpha=0,05$ ), a fim de analisar se há diferença de D-UV<sub>E</sub> em relação às partes do corpo/posição de exposição e, conseqüentemente, determinar a susceptibilidade à danos causados pela exposição à RUV. Os testes estatísticos foram realizados no software SISVAR (FERREIRA, 2011).

#### **4.2. Modelo Geométrico de Transferência Radiativa**

Conforme apresentado na seção 2.4, o MGe proposto por Salvadori et al. (2019) apresenta resultados errôneos e contraditórios para as estimativas de D-UV<sub>E</sub> em diferentes situações geográficas, por exemplo, para localidades do HS, e geométricas, como por exemplo, em casos específicos da posição relativa da superfície inclinada e a posição do Sol. Portanto, o aprimoramento deste MGe é essencial, por isso o objetivo principal desta dissertação, é criar um modelo operacional que sane as limitações do MGe. Nesse sentido, o Modelo Geométrico Aperfeiçoado (MGeA) foi criado em código aberto, utilizando a linguagem Python, tendo em vista que a mesma tem sido amplamente utilizada para diversas análises, entre elas, a meteorológica (ARMS et al., 2020).

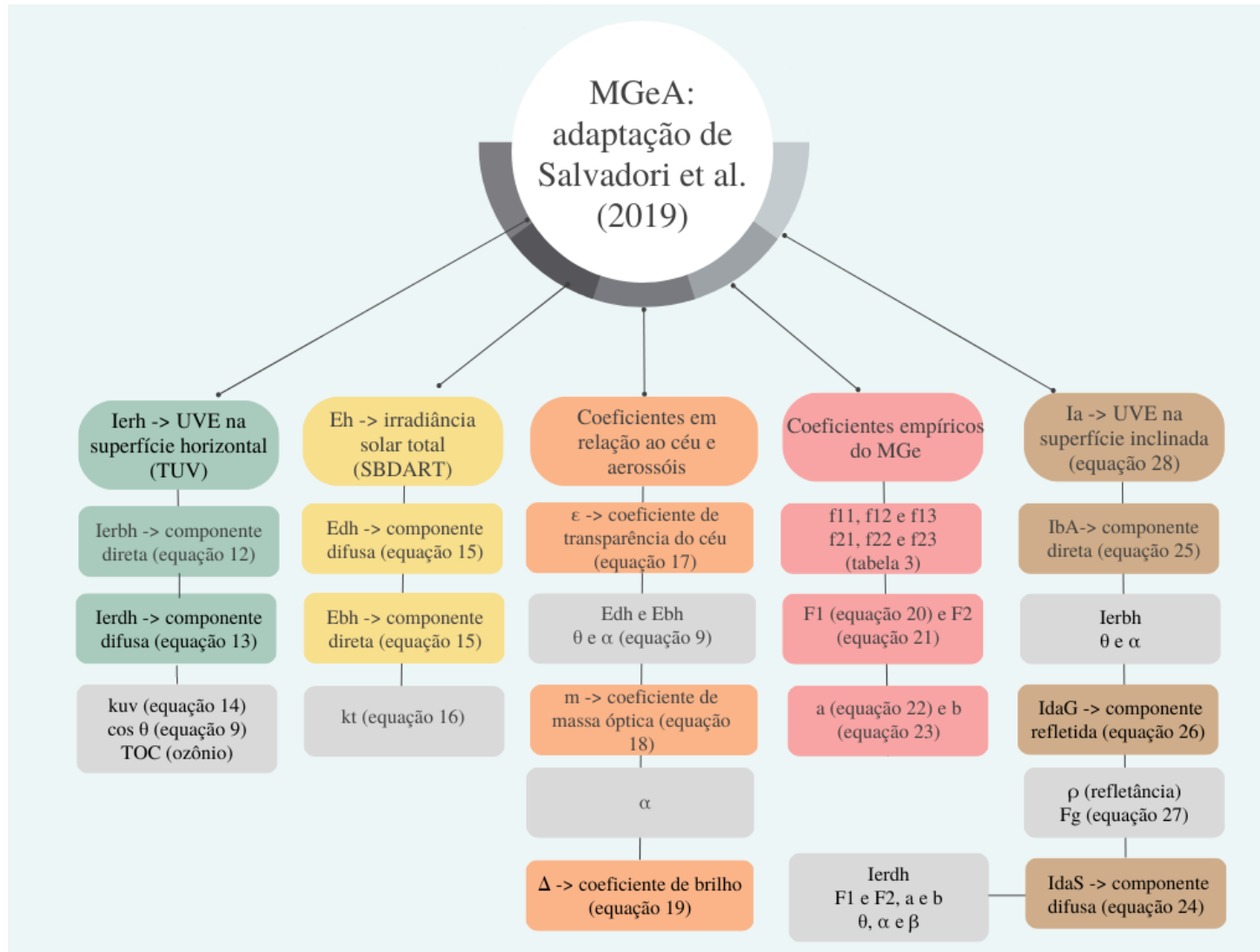
Uma das principais diferenças no MGeA é a possibilidade de simular as irradiâncias de UV em qualquer localização e geometria de inclinação e orientação. Isso é possível devido as rotinas operacionais e as modificações nas condições de entrada, como: irradiância eritêmica em uma superfície horizontal ( $I_{erh}$ ), irradiância UV eritêmica no topo da atmosfera ( $I_{erhTOP}$ ), irradiância solar total em uma superfície horizontal ( $E_h$ ) e irradiância solar total no topo da atmosfera ( $E_{hTOP}$ ), pois, desta forma, os valores supracitados acima são coerentes com as condições atmosféricas de cada local, inibindo valores constantes e aproximações que ocasionavam problemas quanto aos resultados fornecidos pelo MGe.

As limitações do MGe foram resolvidas no MGeA, entre outras modificações, considerando as variações locais e sazonais dos parâmetros como:  $I_{erh}$ ,  $I_{erhTOP}$ ,  $E_h$  e  $E_{hTOP}$ . Para tanto,  $I_{erh}$  e  $I_{erhTOP}$ , passaram a ser estimados por meio do modelo de transferência radiativa *Tropospheric Ultraviolet and Visible (TUV) Radiation Model* (MADRONICH, 1992)

e as medidas  $E_h$  e  $E_{hTOP}$  foram estimadas por meio do modelo de transferência radiativa *Santa Barbara DISORT Atmospheric Radiative Transfer* (SBDART, RICCHIAZZI et al., 1998). As condições de entrada do MGeA são especificadas na tabela 3 e o algoritmo do MGeA é apresentado na figura 9. As variáveis utilizadas são divididas em cinco categorias para facilitar o entendimento, enquanto as equações são discriminadas ao longo do texto.

**Tabela 3:** Variáveis e constantes de entrada no modelo geométrico adaptado (MGeA)

Variáveis de entrada	Unidade	Significado
Dia do ano (DOY)	Adimensional	Dia do ano, sendo DOY = 1 para 01/01 e DOY = 355 para 31/12.
Hora do dia (UT)	Hora	Hora do dia, entre 0h00 e 23h59, considerando UTC
Latitude	graus (°'")	Localização geográfica, sendo – para HS e + para HN
Longitude	graus (°'")	Localização geográfica, sendo – para HS e + para HN
Albedo	Adimensional	Especificação de refletância da superfície
Tempo de exposição	Segundos (s)	Tempo de exposição para cálculo de D-UVE
I <sub>erh</sub>	W/m <sup>2</sup>	Irradiância UV eritêmica em uma superfície horizontal
I <sub>erhTOP</sub>	W/m <sup>2</sup>	Irradiância UV eritêmica no topo da atmosfera
$E_h$	W/m <sup>2</sup>	Irradiância solar total em uma superfície horizontal
$E_{hTOP}$	W/m <sup>2</sup>	Irradiância solar total no topo da atmosfera



**Figura 9:** Fluxograma resumo do algoritmo adaptado de Salvadori et al. (2019).



O primeiro incremento realizado no MGe foi a inserção das equações para calcular os parâmetros geográficos e astronômicos que permitem estimar as variáveis de entrada do MGeA com maior precisão. Tais parâmetros são:

- a)  $\Gamma$ , ângulo em relação a órbita elíptica da Terra em torno do Sol, sendo  $\Gamma = 0$  rad para o primeiro dia do ano e, aproximadamente  $2\pi$  para o último dia do ano.

$$\Gamma = 2 * \pi * \left(\frac{DOY-1}{365}\right) \quad (4)$$

Em que DOY é o dia do ano, sendo 1 o primeiro dia do ano e 365 o último.

- b)  $\delta$ , declinação solar (rad)

$$\delta = (0.006918 - 0.399912 * \cos(\Gamma) + 0.070257 * \sin(\Gamma) - 0.006758 * \cos(2\Gamma) + 0.000907 * \sin(2\Gamma) - 0.002697 * \cos(3\Gamma) + 0.00148 * \sin(3\Gamma)) \quad (5)$$

Em que  $\Gamma$  foi definido na equação 4.

- c)  $et$ , equação do tempo (rad)

$$et = (0.000075 + 0.001868 * \cos(\Gamma) - 0.032077 * \sin(\Gamma) - 0.014615 * \cos(2\Gamma) - 0.04089 * \sin(2\Gamma)) \quad (6)$$

Em que  $\Gamma$  foi definido na equação 4.

- d)  $\omega$ , ângulo horário (graus)

$$\omega = \left(UT + \left(\frac{lon}{15}\right) - (12 - et)\right) * \frac{360}{24} \quad (7)$$

Em que UT é a hora do dia, lon é longitude em graus e et a equação do tempo em horas.

- e)  $t_{sa}$ , tempo solar verdadeiro

$$t_{sa} = UT + et + \frac{lon-15}{15} \quad (8)$$

Em que UT, lon e et foram definidos na equação 7.

- f)  $\alpha$ , ângulo de elevação do Sol (rad)

$$\sin \alpha = \cos \theta = (\cos (lat * \pi/180) * \cos(\delta * \pi/180) * \cos(\omega * \pi/180) + \sin(lat * \pi/180) * \sin(\delta * \pi/180)) \quad (9)$$

Em que  $\theta$  é o ângulo entre o raio solar incidente (direção do sol) e a reta normal à superfície de terrestre,  $\text{lat}$  é a latitude,  $\delta$  é o ângulo da declinação solar e  $\omega$  é o ângulo horário, todos em graus.

h)  $\gamma_s$ , ângulo azimute (rad)

$$\sin \gamma_s = \frac{\cos \delta * \sin \omega}{\cos \alpha} \quad (10)$$

Em que  $\delta$  foi definido na equação 5,  $\omega$  definido na equação 7 em radiano e  $\alpha$  definido na equação 9.

Em seguida, foram realizados os cálculos em relação às componentes direta e difusa de RUV. A  $I_{erh}$  é estimada pelo TUV e composta pela soma das componentes direta e difusa. Para que este valor seja simulado pelo MTR, é necessário o valor do TOC, fornecido pelo Instrumento de Monitoramento de Ozônio da NASA (OMI) (<https://ozoneaq.gsfc.nasa.gov>). Além disso, o uso do MTR permite que a localização geográfica seja específica daquela condição e localização estudada e, assim, diferencie-se das constantes utilizadas por Salvadori et al. (2019).

Por outro lado, tendo em vista a simplicidade, equações empíricas foram consideradas por Salvadori et al. (2019) para calcular as componentes difusa ( $I_{erdh}$ , equação 11) e direta ( $I_{erbh}$ , equação 12) de UVE em uma superfície horizontal. A componente difusa é ponderada pelo índice de claridade em relação a UVE ( $k_{UV}$ , equação 14), cosseno de  $\theta$  e TOC.

$$I_{erdh} = I_{erh} * (1,20 - 35,4 * k_{UV} + 0,50 \cos \theta - 0,0012 * \text{TOC}) \quad (11)$$

$$I_{erbh} = I_{erh} - I_{erdh} \quad (12)$$

Em que  $I_{erdh}$  é a componente difusa [ $\text{W}/\text{m}^2$ ],  $I_{erbh}$  é a componente direta [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] e  $I_{erh}$  a UVE total na superfície horizontal [ $\text{W}/\text{m}^2$ ],  $k_{UV}$  é o índice de claridade para a irradiância de UVE (adimensional), **TOC** o conteúdo total de ozônio (em unidades Dobson, DU).

O índice de claridade em relação a UVE ( $k_{UV}$ , equação 13) é calculado através da razão entre a UVE total na superfície horizontal e a UVE no topo da atmosfera, de forma análoga ao cálculo da transmissividade total, porém, aplicado à UVE. Esse índice é utilizado para descrever a absorção e dispersão da radiação solar ao atravessar a atmosfera (SANCHEZ et al., 2017).

$$k_{UV} = \frac{I_{erh}}{I_{erhTOP}} \quad (13)$$

Também, são calculadas as componentes difusa e direta da irradiância solar total do ultravioleta em uma superfície horizontal (Eq. 14). A componente difusa é calculada a partir de uma equação e coeficientes empíricos propostos por Boland et al. (2001), conforme o algoritmo do MGe.

$$\left. \begin{aligned} E_{dh} &= \frac{E_h}{1 + e^{-5+8,6*k_t}} \\ E_{bh} &= E_h - E_{dh} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Em que  $E_{dh}$  é a componente difusa [ $W/m^2$ ],  $k_t$  o índice de claridade (Eq. 15),  $E_{bh}$  é a componente direta [ $W/m^2$ ] e  $E_h$  a irradiância solar total em superfície horizontal [ $W/m^2$ ].

O índice de claridade ( $k_t$ , equação 15) é calculado através da razão entre a irradiância total na superfície horizontal e a irradiância no topo da atmosfera, isto é, o quanto de RUV do topo da atmosfera atinge a superfície em questão (LIU; JORDAN, 1960).

$$k_t = \frac{E_h}{E_{hTOP}} \quad (15)$$

Em que  $E_h$  é a irradiância solar total na superfície horizontal [ $W/m^2$ ] e  $E_{hTOP}$  a irradiância solar total no topo da atmosfera [ $W/m^2$ ], calculado por  $E_{TOP} * \cos \theta$ , sendo o valor de  $E_{TOP}$  simulado pelo SBDART.

Subsequente, é necessário considerar o coeficiente de transparência do céu ( $\varepsilon$ ), que indica a fração da irradiância solar que incide no topo da atmosfera e que é transmitida depois de atravessar normalmente as camadas da atmosfera. A presença de aerossóis na atmosfera atenua a componente do feixe direto, enquanto aumenta a componente difusa da irradiação solar global (IANETZ; KUDISH, 2008).

O valor de  $\varepsilon$  é calculado pela equação 16, determinado por Perez et al. (1987) que determina os valores dos coeficientes f (f11, f12, f13, f21, f22 e f23), através da tabela 4, conforme recomendação de Salvadori et al. (2019).

$$\varepsilon = \frac{E_{dh} + \frac{E_{bh}}{\sin \alpha} + 1,041 * \theta^3}{1 + 1,041 * \theta^3} \quad (16)$$

Em que  $E_{dh}$  é a componente difusa da irradiância solar total em superfície horizontal [ $W/m^2$ ],  $E_{bh}$  é a componente direta da irradiância solar total em superfície horizontal [ $W/m^2$ ] e  $\alpha$  é o ângulo de elevação do Sol em graus.

**Tabela 4:** Tabela para a seleção dos coeficientes f em função do coeficiente de transparência do céu ( $\varepsilon$ ) de acordo com o método de Perez, extraído de Salvadori et al. (2019).

$\varepsilon$	1–1.065	1.065–1.23	1.23-1.5	1.5–1.95	1.95–2.8	2.8–4.5	4.5–6.2	> 6.2
<b>f11</b>	-0.0083	0.1299	0.3297	0.5682	0.8730	1.1326	1.0602	0.6777
<b>f12</b>	0.5877	0.6826	0.4869	0.1875	-0.3920	-1.2367	-1.5999	-0.3273
<b>f13</b>	-0.0621	-0.1514	-0.2211	-0.2951	-0.3616	-0.4118	-0.3589	-0.2504
<b>f21</b>	-0.0596	-0.0189	0.0554	0.1089	0.2256	0.2878	0.2642	0.1561
<b>f22</b>	0.0721	0.0660	-0.0640	-0.1519	-0.4620	-0.8230	-1.1272	-1.3765
<b>f23</b>	-0.0220	-0.0289	-0.0261	-0.0140	0.0012	0.0559	0.1311	0.2506

Também, é necessário avaliar e ponderar os coeficientes em relação ao céu e aerossóis, que são eles, coeficiente de massa óptica (**m**) e coeficiente de brilho ( $\Delta$ ). O valor de m está associado a quantidade de matéria opticamente ativa atravessada por um feixe de radiação, tanto na vertical quanto na horizontal (KIVALOV, 2007) e o coeficiente de brilho pode ser definido como uma função da espessura da nuvem ou quantidade de aerossol (UTRILLAS et al., 2007). Para valores de  $\alpha \leq 0$ ,  $m = 0$  e, para  $\alpha > 0$ , m é calculado através da equação 17:

$$m = \frac{1}{\text{sen}\left(\frac{\alpha * \pi}{180}\right)} + 0,050572 * (6,07995 * \alpha)^{-1,6364} \quad (17)$$

Já  $\Delta$  é calculado pela equação 18:

$$\Delta = m * \frac{E_{dh}}{E_{TOP}} \quad (18)$$

A partir da tabela 4 e o valor calculado de  $\varepsilon$ , os coeficientes são utilizados para calcular os valores empíricos do coeficiente de irradiância ao redor do Sol (F1, equação 19) e coeficiente de irradiância do horizonte (F2, equação 20).

$$F1 = \text{máximo} [0; f11+f12*\Delta+f13* \theta] \quad (19)$$

$$F2 = \text{máximo} [0; f21+f22*\Delta+f23* \theta] \quad (20)$$

Conforme recomendado por Salvadori et al. (2019), são calculadas as constantes empíricas a (equação 21) e b (equação 22), considerando o ângulo de incidência dos raios solares na superfície investigada.

$$a = \text{máximo} (0, \cos \theta) \quad (21)$$

$$b = \text{máximo} (0,0872, \cos \theta) \quad (22)$$

Por fim, é necessário calcular as componentes difusa ( $I_{dAs}$ , equação 23), direta ( $I_{bA}$ , equação 24) e refletida ( $I_{dAg}$ , equação 25) da irradiância UV eritêmicas em uma superfície inclinada através dos coeficientes F1 e F2 e, então, tem-se:

$$I_{dAs} = I_{erdh} * ((1-F1) * \left( \frac{1+\cos(\beta * \frac{\pi}{180})}{2} \right) + F1 * \left( \frac{a}{b} \right) + F2 * \sin(\beta * \frac{\pi}{180})) \quad (23)$$

Em que  $I_{erdh}$  é a componente difusa da UVE total na superfície horizontal [W/m<sup>2</sup>],.

A componente direta ( $I_{bA}$ ) é calculada pela equação 24:

$$I_{bA} = I_{erbh} * \frac{\cos \theta}{\sin \alpha} \quad (24)$$

Em que  $I_{erbh}$  é a componente direta da UVE total na superfície horizontal [W/m<sup>2</sup>]. Aqui, vale a condição de que, se  $I_{erbh} \leq 0$ ,  $I_{bA} = 0$ .

A componente de UVE refletida ( $I_{dAg}$ ) é calculada pela equação 25:

$$I_{dAg} = I_{erh} * \rho * F_g \quad (25)$$

Em que  $\rho$  é a refletância do solo e  $F_g$  um fator empírico de ponderação em relação a superfície inclinada, calculado pela equação 26.

$$F_g = \frac{(1-\cos \beta)}{2} \quad (26)$$

Desse modo, a UVE na superfície inclinada, caracterizada por uma inclinação  $\beta$ , pode ser calculada através da equação 27, através da soma dos componentes:

$$I_A = I_{bA} + I_{dAg} + I_{dAs} \quad (27)$$

Em que  $I_A$  é a irradiância na superfície inclinada [W/m<sup>2</sup>],  $I_{bA}$  é o componente direto [W/m<sup>2</sup>],  $I_{dAg}$  o componente refletido pelo solo [W/m<sup>2</sup>] e  $I_{dAs}$  o componente difuso pelo céu [W/m<sup>2</sup>].

Então, pode-se calcular a exposição radiante (energia recebida pela unidade de área,  $U_A$ ) durante a duração da exposição ( $\Delta t$ ) através da equação 28:

$$U_A = I_A * \Delta t \quad (28)$$

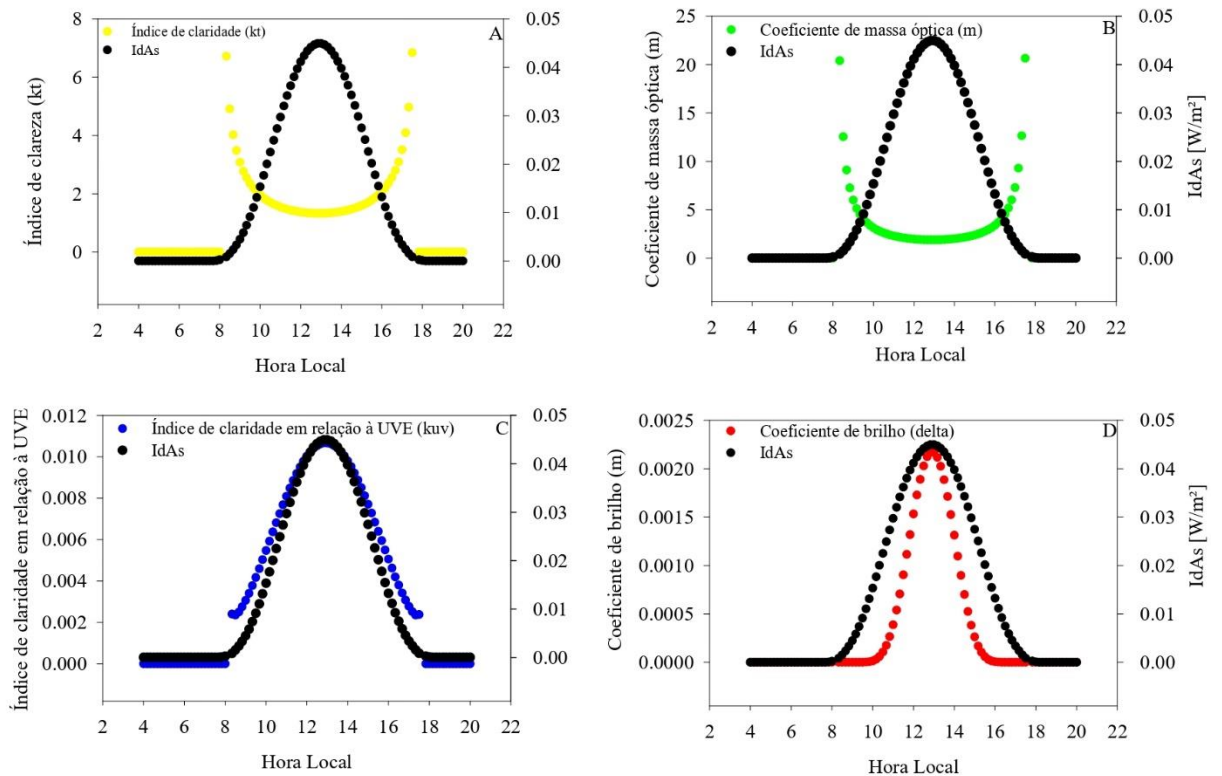
E, por fim, a D-UVE, em SED, pode ser obtido através de:

$$D-UVE = \frac{U_A}{100} \quad (29)$$

A figura 10 mostra o comportamento dos coeficientes:  $k_{UV}$ ,  $k_t$ ,  $\Delta$  e  $m$  e da componente difusa de RUV ( $I_{dAs}$ , em preto) em relação à hora local para uma das situações simuladas pelo MGeA. Os valores de  $k_t$  (figura 10A) e  $m$  (figura 10B) são inversamente proporcionais à  $I_{dAs}$ , de tal forma que os valores máximos desses coeficientes são observados ao nascer e pôr do sol. Como a componente difusa de RUV está relacionada com a presença de nuvens e aerossóis (REINDL et al., 1990), o comportamento desses índices corrobora com o disposto na literatura, uma vez que, em dias de maior  $k_t$  espera-se menor difusão de RUV pela ausência de nuvens

(LIU e JORDAN, 1960), associado, também, a valores menores de  $m$ , uma vez que o caminho a ser percorrido pela RUV terá menor quantidade de atenuantes, fazendo com que a componente difusa de RUV seja menor.

Por sua vez, os coeficientes  $k_{uv}$  (figura 10C) e  $\Delta$  (figura 10D) são diretamente proporcionais à componente difusa de RUV. Assim como encontrado por Utrillas et al. (2007) e Sanchez et al. (2017), espera-se maiores valores de IdAs associados a valores mais altos de  $k_{uv}$ , assim como o  $\Delta$ . Como esses coeficientes dependem da espessura da nuvem ou quantidade de aerossóis na atmosfera, quanto maior a quantidade de atenuantes de RUV na atmosfera, maior o valor desses coeficientes e, também, maior a componente de difusão devido ao espalhamento e desvio do feixe de RUV.



**Figura 10:** Valores dos coeficientes A) índice de clareza ( $k_t$ ), B) coeficiente de massa óptica ( $m$ ), C) índice de clareza em relação à UVE ( $k_{uv}$ ) e D) coeficiente de brilho (delta,  $\Delta$ ), todos em relação à componente difusa de RUV (IdAs, em preto).

#### 4.2.1. Validação do Modelo Geométrico de transferência radiativa

Os dados simulados de D-UVE em locais de baixa latitude no HS foram utilizados para validação do MGeA através de análise estatística em comparação com dados observados na

UNIFEI. Para tanto, comparou-se as medidas realizadas por dosímetros com a saída do MGeA, por meio das estatísticas: raiz do quadrado médio do erro (RQME) (Eq. 30), erro percentual médio absoluto (MAPE, Eq. 31), erro de viés médio (BIAS, Eq. 32), índice de concordância de Willmott (critério d, Eq. 33), índice de desempenho (índice c, Eq. 34), mesmos métodos estatísticos utilizados por Souza et al. (2017), Zhang et al. (2017) e Monteiro e Martins (2019).

$$\text{RQME} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2}{n}} \quad (30)$$

$$\text{MAPE} = \frac{100\%}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{E_i - O_i}{O_i} \right| \quad (31)$$

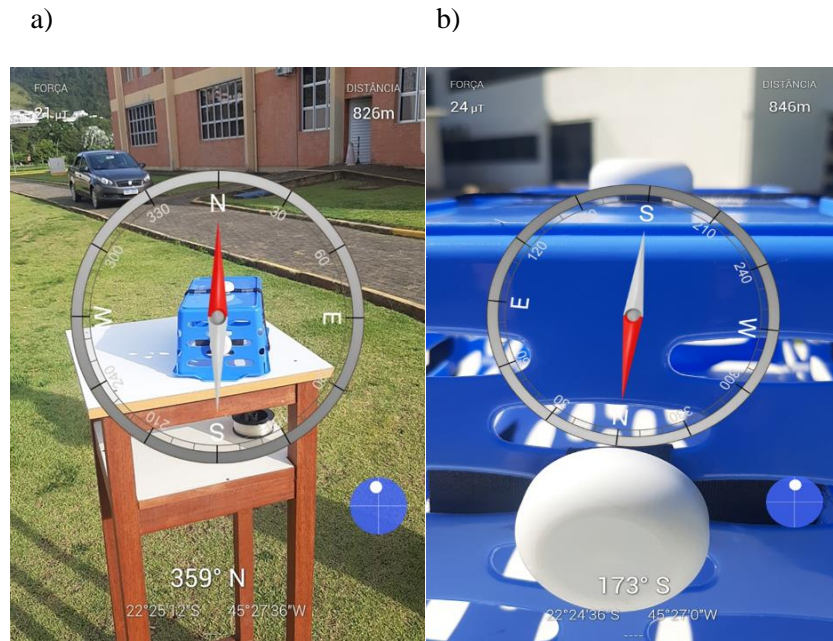
$$\text{BIAS} = \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (32)$$

$$\text{critério d} = 1 - \left( \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|E_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \right) \quad (33)$$

$$\text{índice c} = \left( \frac{\sum (E_i - \bar{E})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum (E_i - \bar{E})^2 \sum (O_i - \bar{O})^2}} \right) * d \quad (34)$$

O critério de interpretação para avaliar o desempenho do modelo a partir do índice c é: > 0,85: excelente; 0,76 a 0,85: muito bom; 0,66 a 0,75: bom; 0,61 a 0,65: razoável; 0,51 a 0,60: ruim; 0,41 a 0,50: muito ruim; ≤ 0,40: extremamente ruim (MONTEIRO; MARTINS, 2019). Na Eq. 35,  $E_i$  são os valores de D-UVE estimados pelo algoritmo MGeA,  $O_i$  os valores de D-UVE medidos no experimento de campo,  $\bar{E}$  a média dos valores de D-UVE estimados pelo MGeA,  $\bar{O}$  a média dos valores de D-UVE medidos no experimento de campo e n o número de observações.

As medições para comparação foram realizadas durante um dia inteiro, com dois dosímetros dispostos com  $\beta = 90^\circ$  e um dosímetro com  $\beta = 0^\circ$  (Figura 9). Entre os dois dosímetros com  $\beta = 90^\circ$ , um encontra-se com azimute voltado para o norte (figura 11a) e o outro, com azimute voltado para o sul (figura 11b). As medições foram realizadas a cada 10 segundos, e as D-UVE integradas para intervalos de 10 minutos.

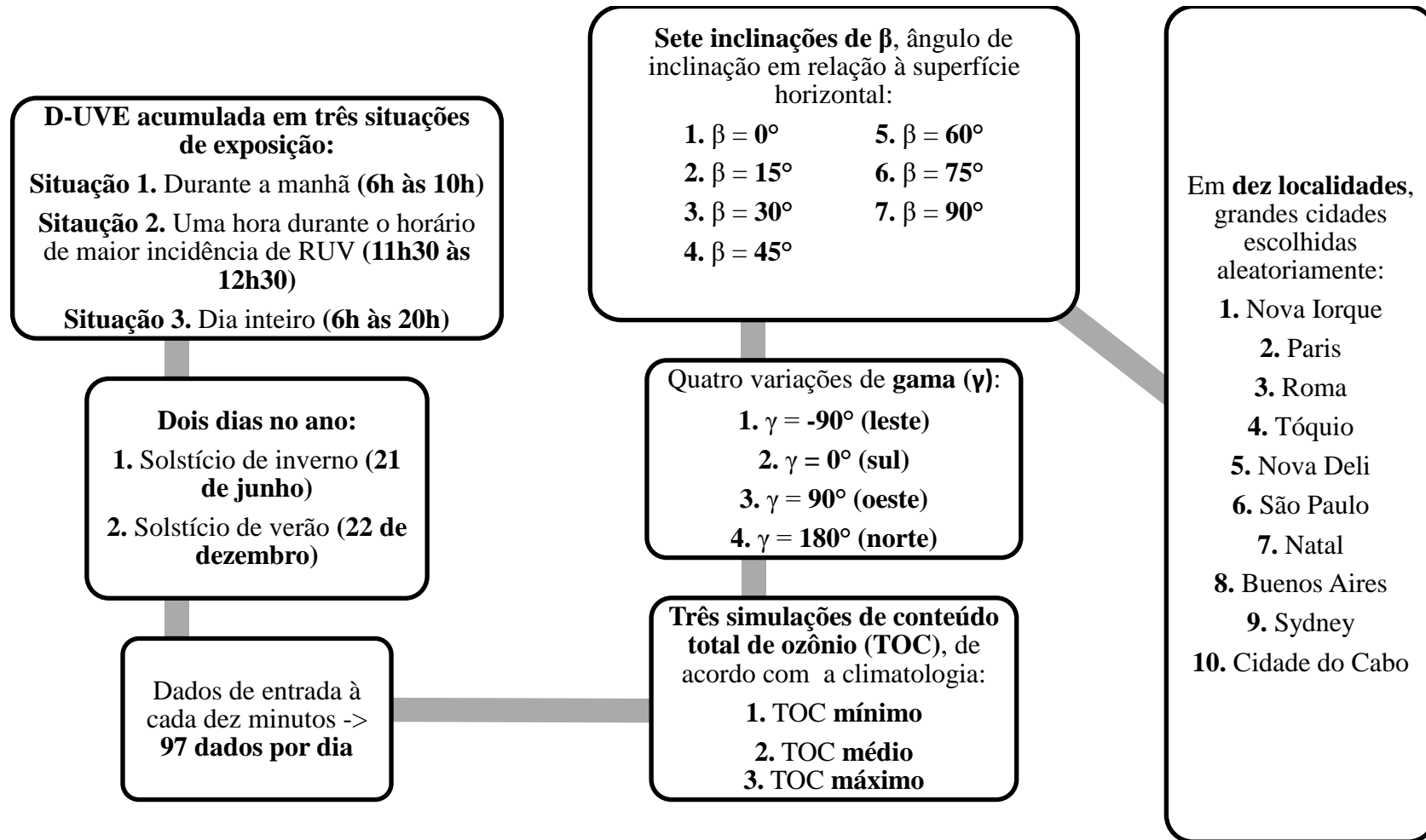


**Figura 11:** Dosímetro em exposição durante o dia de experimento sendo vista a) para direção norte e b) direção sul.

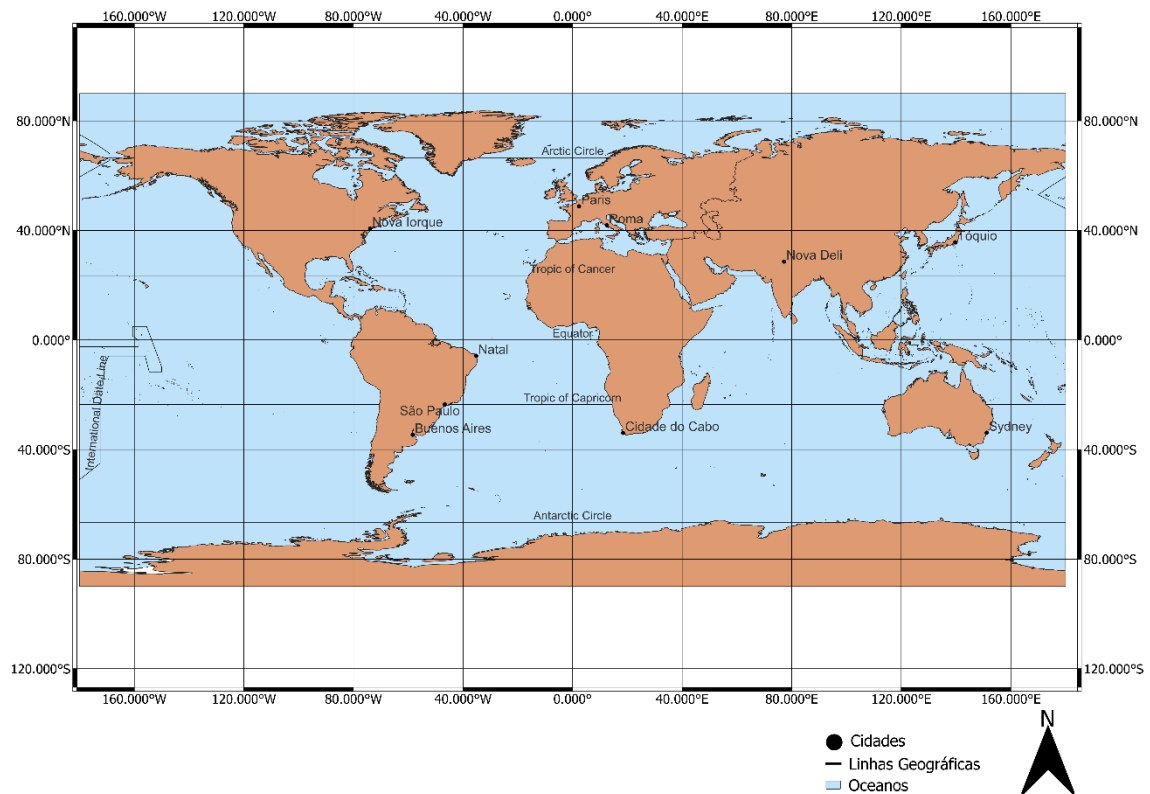
Para que o MGeA seja considerado acurado estatisticamente, é necessário que tenha valores de RQME e BIAS mais baixos, valores de critério  $d$  e índice  $c$  mais altos, e homogeneidade de variância ( $p \geq 0,05$ ).

Após a validação estatística, o MGeA foi testado, de acordo com o fluxograma apresentado na figura 12, para diferentes situações, tanto em relação a parâmetros atmosféricos, através de diferentes valores de TOC, bem como para diferentes localidades, tanto do HN quanto do HS (figura 13) e, também, diferentes condições  $\gamma$ .





**Figura 12:** Fluxograma das condições de entrada utilizadas para validar o aprimoramento do modelo geométrico desenvolvido por Salvadori et al. (2019) (MGeA). As coordenadas geográficas utilizadas para cada cidade encontram-se na tabela 01 do Anexo B.

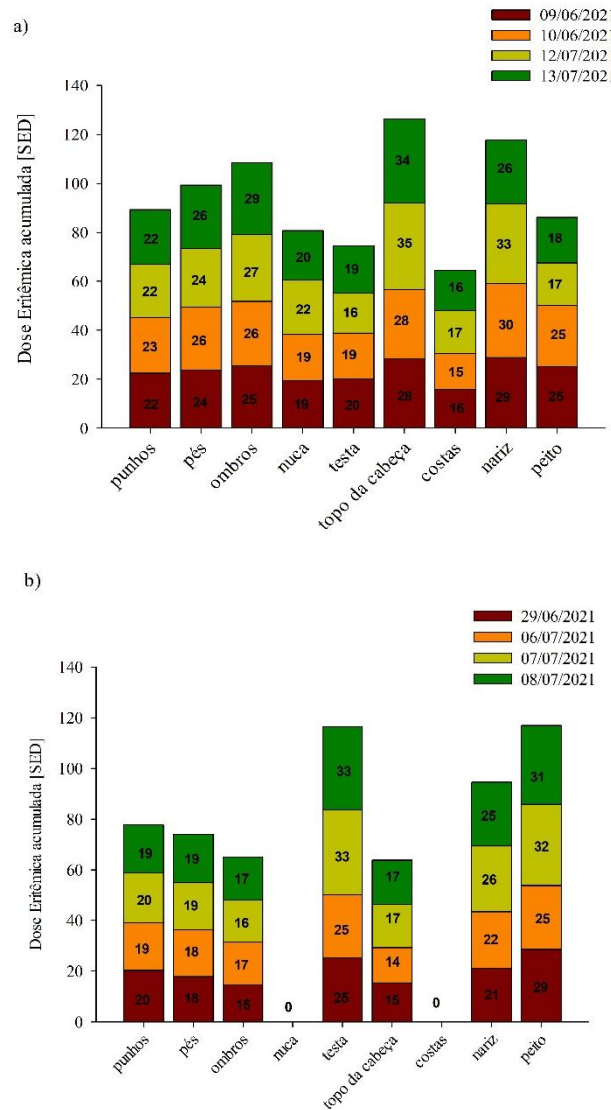


**Figura 13:** Localização das dez cidades escolhidas para o estudo.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. Incidência de RUV em diferentes partes do corpo e diferentes orientações

Foram realizadas quatro medições em cada orientação do manequim, sendo elas: 1) Em pé, posição em que a maioria dos trabalhadores ou praticantes de atividades ao ar livre se encontram e 2) Deitado, posição comum em banhos de sol. Em pé, observa-se que as maiores incidências, sem diferenças significativas, ocorrem no topo da cabeça e nariz, ambas superfícies inclinadas em relação ao Sol. Na posição deitado, as partes do manequim que receberam maiores D-UVE são a testa e o peito. A figura 14 mostra as D-UVE resultantes da exposição de cada parte do corpo do manequim, durante todo o dia. Os valores medidos corroboram com a literatura sobre painéis solares, pois a maior incidência de RUV ocorre sob superfícies com ângulo de inclinação, em relação ao Sol, próximas ao valor da latitude do local.



**Figura 14:** Doses eritêmicas acumuladas em diferentes posições do corpo nas orientações a) em pé e b) deitado.

Os valores de D-UVE não seguiram o pressuposto da normalidade pelo teste de Shapiro-Wilk ( $p > 0,05$ ), sendo necessária a transformação  $\sqrt{x + 0,5}$ , pois na amostra há valores de  $D-UVE = 0$  (RIBEIRO-OLIVEIRA et al., 2008). A aplicação da transformação pode reduzir o efeito dos valores extremos que influenciam na média, além de, aproximadamente, satisfazer as pressuposições do modelo matemático para a análise paramétrica, evitando, assim, interpretações errôneas dos resultados (STORCK et al., 2004).

Os resultados da ANOVA indicaram interação significativa entre a posição dos sensores (fator A) e a orientação do manequim (fator B) ( $p \leq 0,05$ ). O fator B exerceu maior influência na D-UVE ( $F = 156,5$ ) que o fator A ( $F = 68,9$ ). Isso significa que a orientação em que o ser humano se encontra exerce maior influência sob a D-UVE do que a parte do corpo.

Ou seja, a diferença entre a quantidade de RUV que incide nas costas, por exemplo, enquanto o indivíduo está em pé ou deitado é mais significativa do que a diferença entre as diferentes partes do corpo.

Os valores médios das D-UVE encontrados para as duas orientações do manequim (Tabela 5), representam o valor da D-UVE acumulada durante um dia de exposição em cada parte do corpo: 23,7 SED ( $\pm 5,3$ ) para uma pessoa em pé; e, 16,9 SED ( $\pm 10,5$ ), para uma pessoa deitada. O valor alto no desvio padrão enquanto o manequim está deitado se dá pelo fato que, posições em contato ao chão, opostos à incidência solar, como as costas e nuca, não recebem RUV, ou seja, D-UVE = 0 SED nestas partes do corpo.

Em relação à orientação, as médias não apresentaram diferença significativa pelo teste de Scot-Knott (tabela 5). Isso mostra que, independentemente da orientação, a D-UVE média recebida foi suficiente para causar eritema em todos os fototipos (vide valores de DEM na tabela 1).

Corroborado pelo teste de Scott-Knott (tabela 5), tem-se que, nos punhos, não há diferença significativa entre as médias observadas nas duas orientações, uma vez que, em ambas orientações, os punhos estão em posição inclinada com ângulo próximo à 90° em relação ao Sol, variando, apenas, a posição em relação ao horizonte.

Por sua vez, com exceção do sensor localizado no peito e na testa, as demais partes do corpo recebem maior RUV (sinalizadas pela letra “a” minúscula na tabela 5) quando em pé. A exceção é justificada pelo fato de que, quando deitado, superfícies como o peito e a testa estão expostas de maneira paralela ao Sol, recebendo o feixe de RUV sob menor ângulo de inclinação e, deste modo, aumentando a componente direta de RUV. Valores decrescentes de D-UVE para ângulos de inclinação próximos a 90°, em comparação à outras inclinações, também foram encontrados por Salvadori et. al (2019).

**Tabela 5:** Comparação de médias para o D-UVE [SED] acumulado recebido em duas posições nos sensores localizados nas nove partes do corpo em Itajubá, nos meses de julho e agosto de 2021.

Partes do corpo	Em pé	Deitado
Costas	16,1 Da	0,00 Eb
Nariz	29,4 Aa	23,6 Bb
Nuca	20,2 Ca	0,00 Eb
Ombros	27,1 Ba	16,2 Db
Peito	21,5 Cb	29,2 Aa
Pés	24,8 Ba	18,5 Cb
Punhos	22,3 Ca	19,4 Ca
Testa	18,6 Db	29,1 Aa
Topo da cabeça	31,6 Aa	15,9 Db
Média geral	23,7 a	16,9 a

Médias seguidas pelas mesmas letras maiúsculas na coluna, para a variável posição dos sensores, e minúscula na linha, para a variável orientação do manequim, não diferem entre si pelo teste Scott-Knott ( $\alpha=0,05$ ). As letras **A** ou **D** foram dispostas, em ordem decrescente, a partir da maior dose eritêmica observada entre as nove posições dos sensores e as letras **a** e **b** foram dispostas em ordem decrescente, a partir da maior dose eritêmica observada entre as diferentes orientações do manequim. Assim, partes do corpo com médias sinalizadas com A são maiores e diferem significativamente que médias sinalizadas com D (em pé) e E (deitado), enquanto partes do corpo com “a” recebem maior RUV em determinada orientação que as medias sinalizadas com “b”.

Embora a diferença entre os valores de D-UVE observados nas diferentes partes do corpo seja significativa, as D-UVE diárias acumuladas durante a exposição no inverno austral podem atingir valores suficientes para provocar eritema em pessoas com fototipo máximo, VI (FITZPATRICK, 1988), em qualquer parte do corpo. Tais resultados indicam a necessidade de fotoproteção, com ênfase na face, independentemente da orientação do indivíduo. Esse resultado é similar ao encontrado por Backes et al. (2019) e Owusu et al. (2022) para outras localidades, reforçando, assim, a necessidade de adequação de normativas e do uso de fotoproteção adequada proposto por Santos et al. (2018) e Addor et al. (2022).

## 5.2. Verificação e Validação estatística da adaptação do modelo geométrico (MGeA)

As mesmas condições de estudo aplicadas por Salvadori et al. (2019) para a cidade de Pisa foram replicadas no MGeA. As tabelas 6 e 7 fornecem uma comparação direta dos

valores de D-UVE, em SED, obtidos para superfícies inclinadas voltadas para sul ( $\gamma = 0^\circ$ ) e norte ( $\gamma = 180^\circ$ ) respectivamente. Os valores considerando a superfície horizontal  $\beta = 0^\circ$  são dispostos na tabela 6, pois não há variação em relação à direção. Como se pode notar, os valores da D-UVE para as faces viradas a sul são em média 1,1 vezes superior aos respectivos valores para as superfícies orientadas a norte com o mesmo  $\beta$ . Entretanto, para  $\beta = 15^\circ$ , valor no qual a componente refletida ( $I_{dAg}$ ) é inferior em comparação a valores maiores de  $\beta$ , observa-se pouca diferença entre os valores voltados para sul e norte. Outro destaque é que, em relação à superfície horizontal, com a face voltada para sul, em que os valores de D-UVE observados em  $15^\circ < \beta < 60^\circ$  igualam ou superam os observados em  $\beta = 0^\circ$ , indicando maior exposição à RUV.

Em relação ao MGe, a discrepância de resultados ocorreu ao considerar  $\gamma = 180^\circ$  (tabela 7). Ao considerar esta orientação, observa-se que os valores calculados pelo MGeA diferem dos valores encontrados pelo MGe (tabela 2). Quanto à posição norte, espera-se, que as D-UVE máximas sejam observadas em valores de  $\beta$  entre 15 e  $30^\circ$ , próximos do ângulo zenital. Além disso, quanto mais inclinada estiver a superfície ( $\beta \rightarrow 90^\circ$ ), menor a D-UVE observada, uma vez que a componente direta ( $I_{bA}$ ) tende a zero devido à predominância dos fenômenos de espalhamento, entretanto, vale ressaltar que, em  $15^\circ < \beta < 60^\circ$ ,  $I_{bA} \neq 0$ . Tais condições foram satisfeitas nos resultados simulados a partir do MGeA.

Os resultados do MGeA também apresentaram bom desempenho estatístico, com valores baixos de RQME, MAPE e BIAS (RQME= 0.22 SED, MAPE = 1.5% e BIAS = 0.30) e valores altos de critério d e índice c ( $d = 0.96$  e  $c = 0.92$ ).

**Tabela 6:** Resultados do cálculo para superfícies inclinadas voltadas para a direção sul (21 de junho, meio-dia solar).

Ângulo ( $\beta$ )	$0^\circ$	$15^\circ$	$30^\circ$	$45^\circ$	$60^\circ$	$75^\circ$	$90^\circ$	$23,4^\circ$
Ierdh	0,158	0,158	0,158	0,158	0,158	0,158	0,158	0,158
Ierbh	0,056	0,056	0,056	0,056	0,056	0,056	0,056	0,056
IdAg	0	4,01E-05	1,58E-04	3,45E-04	5,88E-04	8,72E-04	1,18E-03	9,68E-05
IdAs	0,158	0,164	0,167	0,169	0,168	0,164	0,159	0,166
cos $\theta$	0,938	0,996	0,986	0,908	0,769	0,577	0,346	0,999
IbA	0,056	0,060	0,059	0,054	0,046	0,035	0,021	0,060
IA	0,214	0,223	0,226	0,223	0,214	0,200	0,181	0,23
UA	770	804	815	804	771	719	650	812,7

D-UVE								
(MGeA, SED)	7,7	8,0	8,2	8,0	7,7	7,2	6,5	8,1

**Tabela 7:** Resultados do cálculo para superfícies inclinadas voltadas para a direção norte (21 de junho, meio-dia solar).

Ângulo ( $\beta$ )	15°	30°	45°	60°	75°	90°
Ierdh	0,158	0,158	0,158	0,158	0,158	0,158
Ierbh	0,056	0,056	0,056	0,056	0,056	0,056
IdAg	4,01E-05	1,58E-04	3,45E-04	5,88E-04	8,72E-04	1,18E-03
IdAs	0,164	0,167	0,169	0,168	0,164	0,159
cos $\vartheta$	0,816	0,639	0,418	0,169	-0,092	-0,346
IbA	0,049	0,038	0,025	0,010	0,000	0,000
IA	0,212	0,206	0,194	0,178	0,165	0,160
UA	765	740	698	642	594	576
D-UVE (MGeA, SED)	7,7	7,4	7,0	6,4	5,9	5,8

### 5.2.1. Simulação de D-UVE em diferentes cidades do mundo

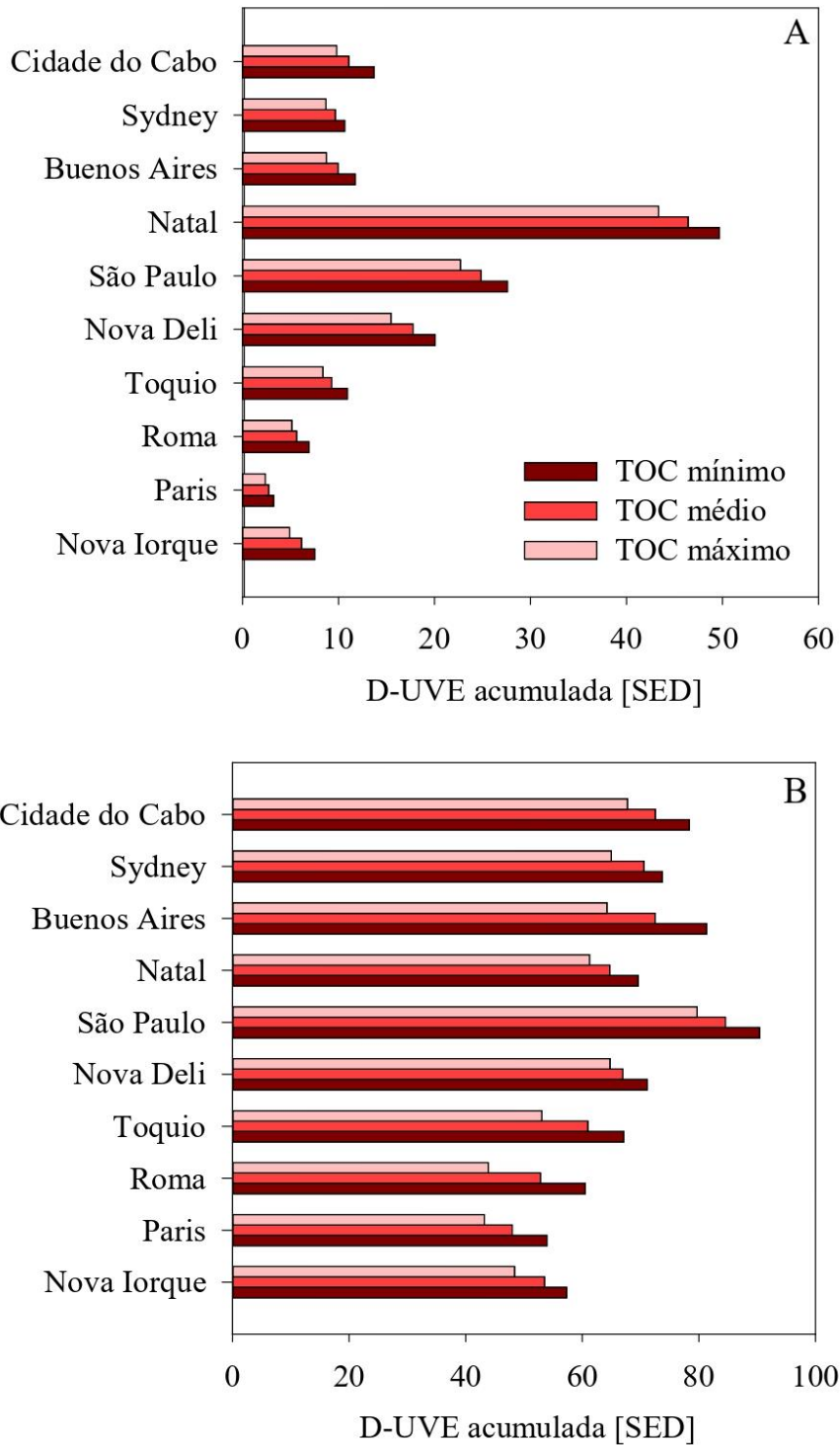
D-UVE acumuladas foram estimadas, com base na metodologia apresentada na Figura 13 e para as dez cidades apresentadas na Figura 14, em três diferentes situações de exposição:

- ✓ Situação 1) durante a manhã (das 6h às 10h);
- ✓ Situação 2) uma hora durante o meio do dia (das 11h30 às 12h30);
- ✓ Situação 3) dia inteiro (das 6h às 20h).

162.960 valores de D-UVE foram calculados segundo a posição geográfica, DOY, hora do dia, TOC, ângulos  $\gamma$  e  $\beta$ . Os resultados completos estão disponíveis em <https://doi.org/10.5281/zenodo.7594850>.

Os valores de TOC foram interpolados para cada localidade, a partir da climatologia disponibilizada no site da Administração Nacional Oceânica e Atmosférica (em inglês: *National Oceanic and Atmospheric Administration* – NOAA) (<https://esrl.noaa.gov/gmd/grad/neubrew/SatO3DataTimeSeries.jsp>). Conforme esperado,

menores valores de TOC implicam em valores mais altos de D-UV<sub>E</sub> em superfície (figura 15), uma vez que o ozônio é atenuador de RUV. A diferença é considerada significativa, uma vez que os valores podem variar em até 6 SED no inverno e até 17 SED no verão.



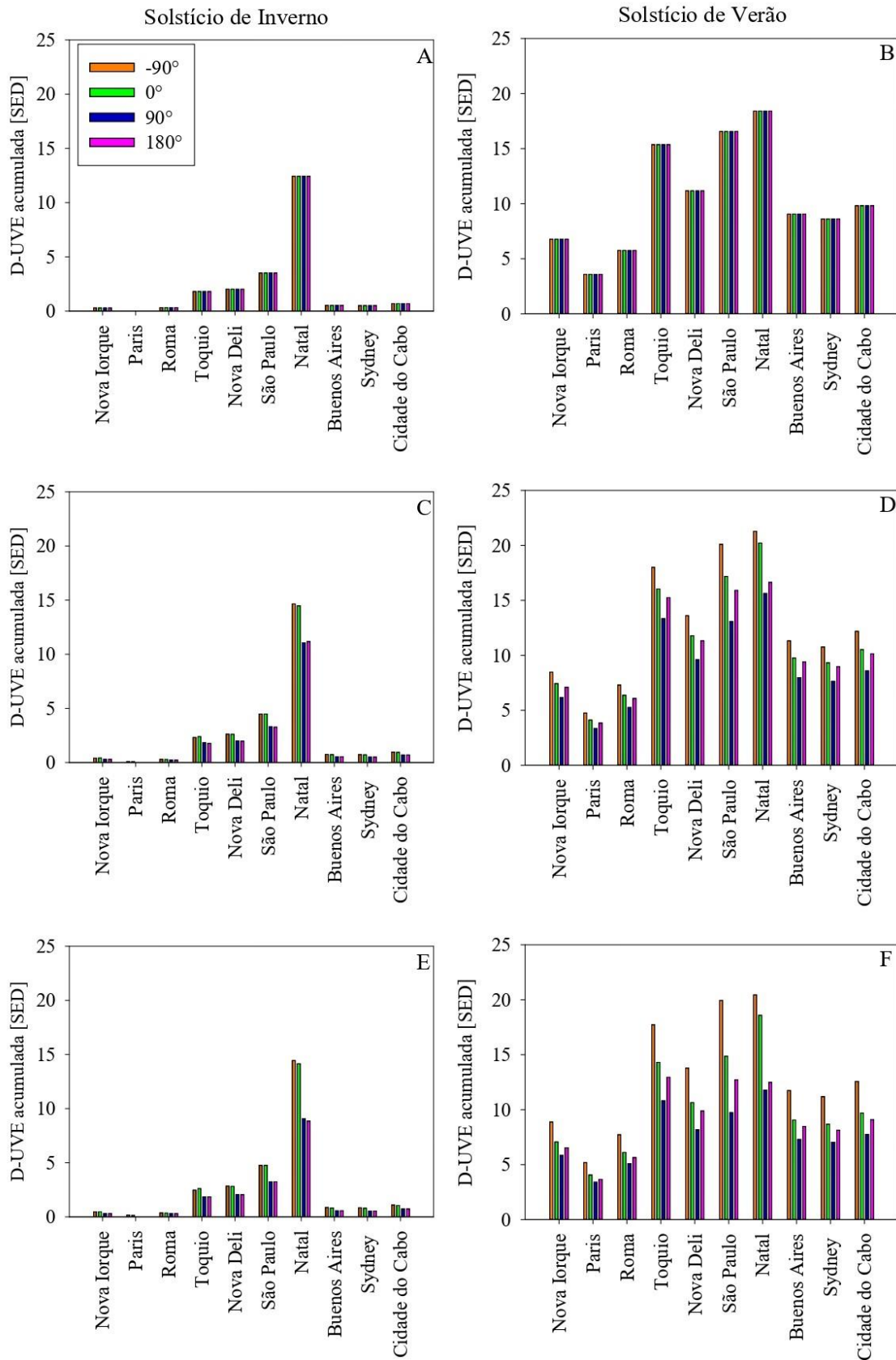
**Figura 15:** Doses eritêmica acumulada em dez diferentes cidades, em uma superfície horizontal ( $\beta=0^\circ$ ), entre às 6h e 20h no solstício de A) inverno e B) verão.

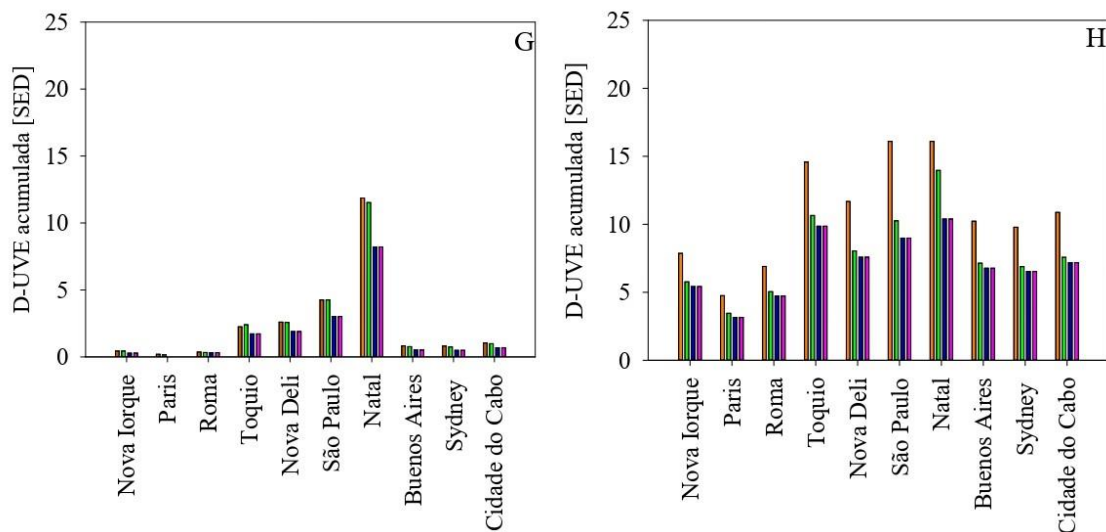


A Figura 16 mostra os valores de D-UVB simulados para as diferentes posições de  $\gamma$  e  $\beta$  considerando a situação 1 de exposição, entre 6h e 10h da manhã. Portanto, quando a superfície não possui inclinação ( $\beta = 0^\circ$ , figuras 16A e 16B), não há variação entre as D-UVB acumuladas nos diferentes ângulos  $\gamma$ . Isso ocorre pois com  $\beta = 0^\circ$  não há diferenças para a posição azimutal e a componente refletida é igual a zero. Também, quando a superfície se encontra na horizontal, o ângulo entre o raio solar incidente (direção do sol) e a reta normal à superfície é igual ao ângulo zenital, não havendo, assim, variação no valor da D-UVB em relação ao ângulo de incidência.

Já nas figuras 16C à 16H, é possível observar o efeito da inclinação da superfície ( $\beta$ ) sobre a disponibilidade de radiação. Para a situação 1, observa-se que, tanto no solstício de inverno (figura 16, coluna esquerda) quanto no solstício de verão (figura 16, coluna direita), independentemente da localidade e com  $\beta \neq 0^\circ$ , os maiores valores de D-UVB são observados na orientação de  $\gamma = -90^\circ$ . Isso ocorre, pois no horário observado o sol está nascendo, e a orientação da superfície inclinada encontra-se voltada para o leste ( $\gamma = -90^\circ$ ), justamente na direção em que o Sol está se posicionando no horizonte.

Por sua vez, considerando que no solstício de verão a declinação solar  $\sim 23,4^\circ$ , observa-se valores maiores de D-UVB registrados em  $\beta = 30^\circ$  (figura 16C) em relação aos outros ângulos (coluna esquerda), tendo em vista a posição da Terra e do Sol. Por sua vez, no solstício de inverno (coluna direita) observa-se menores diferenças entre a D-UVB simulada para diferentes valores de  $\beta$ , uma vez que nesta situação em específico, tendo em vista que, devido à composição atmosférica, época do ano e localização, a relação entre os ângulos  $\beta$  e  $\gamma$  pode variar. Destaca-se também a falta de sazonalidade da RUV em regiões equatoriais, aqui, representada por Natal, que, ainda nas primeiras horas do nascer do Sol e no inverno, possui valores de D-UVB prejudiciais a todos os fototipos, corroborando com o alerta sobre altos índices de incidência de RUV nesta localidade realizado por Coariti (2017).





**Figura 16:** Doses eritêmicas (D-UVe) acumuladas em superfícies inclinadas ( $\beta=0^\circ$ , figuras A e B;  $\beta=30^\circ$ , figuras C e D;  $\beta=60^\circ$ , figuras E e F; e,  $\beta=90^\circ$ , figuras G e H), para diferentes orientações em relação ao sol  $\gamma = -90^\circ$  (barra vertical laranja),  $0^\circ$  (verde),  $90^\circ$  (azul) e  $180^\circ$  (rosa), entre às 6h e 10h, nos solstícios de inverno (coluna esquerda) e verão (coluna direita) em cada hemisfério.

A tabela 8 mostra as D-UVe estimadas para a situação 2 durante o solstício de verão sob  $\beta=30^\circ$  e  $\beta=90^\circ$ , considerando a face para sul ( $\gamma = 0^\circ$ ) e norte ( $\gamma = 180^\circ$ ). Em média, são observados, para o mesmo  $\beta$ , valores 1,3 vezes maiores na face para sul do que para norte. Assim como esperado, os valores observados em  $\beta=90^\circ$  são significativamente menores que os observados em  $\beta=30^\circ$ , ainda que sob o mesmo tempo de exposição. Isso ocorre pelo fato de que em  $\beta=30^\circ$  as componentes, direta e difusa, influenciam a incidência de RUV; enquanto em  $\beta=90^\circ$ , a componente direta tende a zero, e o total de RUV resulta praticamente da componente difusa.

Ao analisar os resultados simulados pelo MGeA considerando à superfície inclinada como parte do corpo humano, observa-se que os valores simulados para uma hora de exposição são suficientes para causar eritema em um indivíduo em todas as localidades, variando, apenas, a DEM atingida durante a exposição. Em  $\beta=30^\circ$ , que pode ser a inclinação representativa do nariz, por exemplo, observa-se, no HS e em alguns locais do HN, valores que superam a DEM necessário para um indivíduo fototipo VI. Vale ressaltar que, os valores mínimos observados ( $\beta=90^\circ$  e face voltada para o norte ( $\gamma = 180^\circ$ )), são capazes de causar eritema em um indivíduo fototipo III.

**Tabela 8:** Dose Eritêmica (D-UVE, em SED) acumulada durante uma hora de exposição, entre 11h30 e 12h30, no solstício de verão, para superfícies inclinadas com  $\beta=30^\circ$  e  $\beta=90^\circ$ , com a face voltada para o Sul ( $\gamma = 0^\circ$ ) e Norte ( $\gamma = 180^\circ$ ).

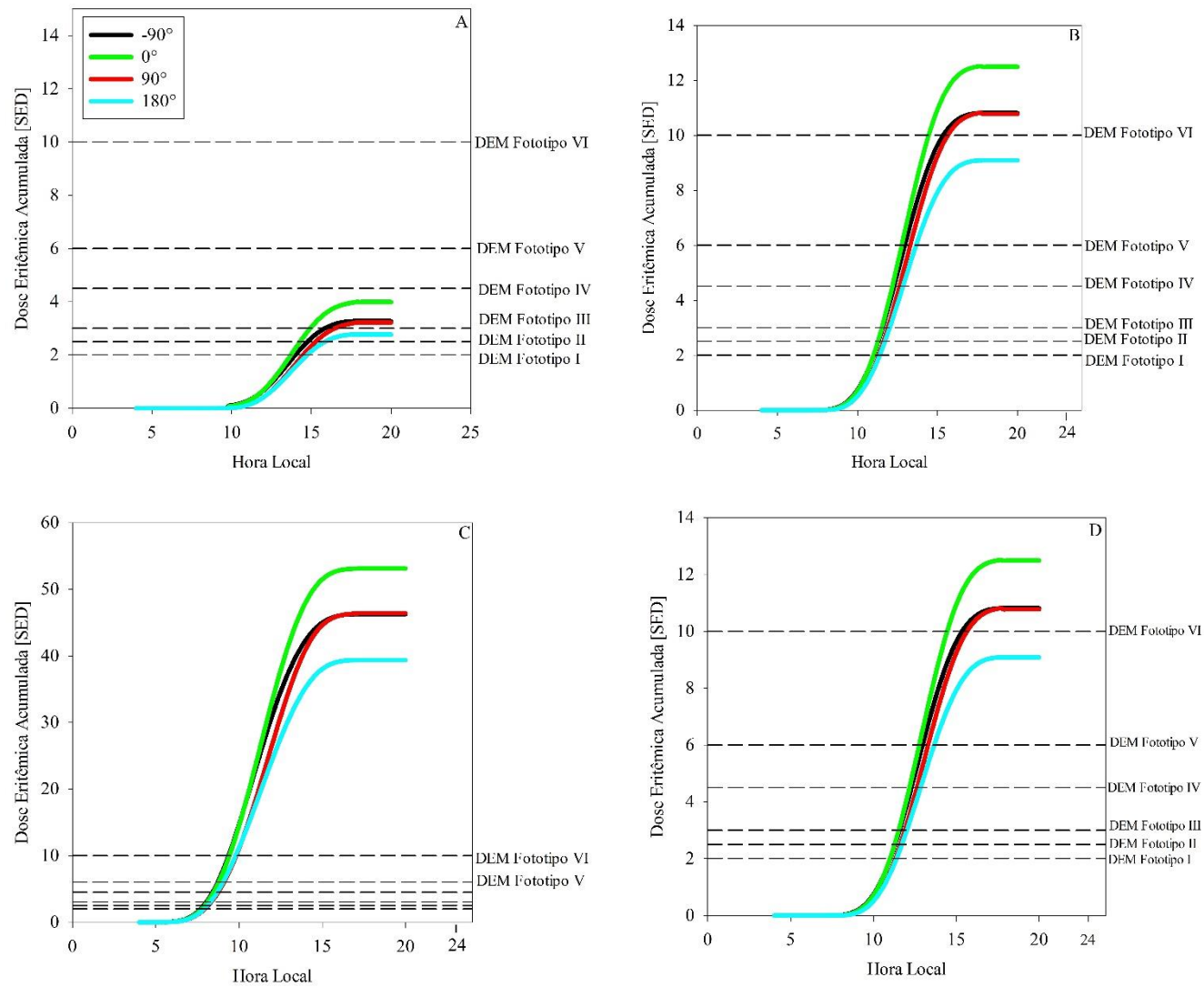
D-UVE acumulada [SED]	Sul $\gamma = 0^\circ$		Norte $\gamma = 180^\circ$	
	$\beta=30^\circ$	$\beta=90^\circ$	$\beta=30^\circ$	$\beta=90^\circ$
	Nova Iorque	9,2	5,5	7,9
Paris	7,2	5,1	6,0	4,0
Roma	8,8	5,5	7,6	4,2
Tóquio	11,0	5,5	9,6	4,1
Nova Deli	11,8	4,4	11,1	3,6
São Paulo	14,5	6,3	14,5	3,5
Natal	13,4	6,7	10,5	3,9
Buenos Aires	12,5	5,6	11,0	4,1
Sydney	12,1	5,5	10,8	4,2
Cidade do Cabo	12,6	5,5	11,2	4,0

D-UVE acumulada em uma hora de exposição no dia do solstício de verão foram sinalizadas de acordo com a Dose Eritêmica Mínima (DEM), seguindo a legenda: rosa claro: D-UVE superior a DEM fototipo III, rosa: D-UVE superior a DEM fototipo IV, laranja: D-UVE superior a DEM fototipo V e vermelho: D-UVE superior a DEM fototipo VI.

Por fim, a D-UVE acumulada ao longo do dia, no solstício de inverno, foi simulada para quatro cidades (duas no HN e duas no HS). Nesta simulação considerou-se uma superfície inclinada ( $\beta=30^\circ$ ) e a situação hipotética de exposição durante o dia todo sem nenhuma proteção (figuras 17A a D). A inclinação  $\beta=30^\circ$  foi escolhida para esta análise por apresentar os maiores valores de D-UVE.

Em Paris (figura 17A), observa-se valores mais baixos de D-UVE comparado à outras localidades. Mesmo assim, a D-UVE acumulada é suficiente para causar eritema nos fototipos I a III, que caracterizam a maior parte da população francesa (MAHÉ et al., 2011). Em Tóquio (figura 17B) e Sydney (figura 17D), a exposição foi suficiente para causar eritema nos fototipos I a V, mesmo para a orientação para o norte ( $\gamma = 180^\circ$ ) onde os menores valores de D-UVE são observados. Porém, considerando as outras orientações, a exposição até o meio-dia pode ser capaz de ocasionar eritema em indivíduos fototipo IV. Em Natal (figura 17C), a D-UVE acumulada até às 10h pode ser suficiente para causar eritema em todos os fototipos. A localização de Natal próxima à linha do equador constitui o principal fator responsável pela

grande incidência de RUV, que, em um dia de céu claro e atmosfera limpa, pode atingir o ser humano com D-UVB de até 50 SED. Ou seja, a exposição de um dia inteiro, sem proteção, é extremamente danosa à saúde humana.



**Figura 17:** Doses eritêmica acumulada, no solstício de inverno, em uma superfície inclinada ( $\beta=30^\circ$ ), entre às 4h e 20h, em A) Paris, B) Tóquio, C) Natal e D) Sydney

## 6. CONCLUSÕES

Este estudo analisou a variação da incidência de RUV em diferentes partes do corpo considerando características geográficas e atmosféricas distintas, tempo de exposição e a posição e inclinação do indivíduo em relação ao Sol. Para tanto, foi realizado um experimento de campo e o aperfeiçoamento de um modelo geométrico tridimensional (MGeA) que permitiu simular as D-UVE em superfícies inclinadas em qualquer local do planeta.

A exposição do manequim adaptado com os dosímetros mostrou que, um indivíduo em pé, recebe as maiores incidências de RUV no topo da cabeça e nariz. Porém, ainda que em menor quantidade, outras partes do corpo também podem receber quantidade de RUV danosas à saúde. Na posição deitado, as partes do manequim que receberam as maiores D-UVE foram a testa e o peito. Obviamente, partes do corpo que estão opostas à incidência solar, como por exemplo, costas e nuca, recebem doses insignificantes de RUV.

A análise estatística, usando ANOVA, indicou interação significativa entre as fontes de variação “posição dos sensores”, isto é a região do corpo, e a “posição do indivíduo” ( $p \leq 0,05$ ). Esta última teve maior influência na distribuição da D-UVE ( $F = 156,5$ ) do que a região do corpo ( $F = 68,9$ ). Isso significa que a distribuição da D-UVE no corpo se deve mais à orientação em que o ser humano se encontra do que a parte do corpo que recebe o feixe de radiação. Por exemplo, considerando que, em momentos de lazer na praia ou piscina, um indivíduo opte por ficar deitado em um local exposto ao Sol, a incidência de RUV pode ser significativamente maior do que aquela recebida por um indivíduo que se encontra em pé no mesmo local.

O MGeA desenvolvido neste estudo baseou-se no MGe proposto por Salvadori et al. (2019). As principais modificações realizadas foram: a) o desenvolvimento do modelo em linguagem Python; b) a implementação de condições de entrada adaptadas às variações geográficas e temporais; e, c) a implementação de equações que calculem os parâmetros geométricos e astronômicos dentro do código do modelo. A análise estatística mostrou que o MGeA apresenta bom desempenho, com valores baixos das principais métricas de erros (RQME= 0,22 SED, MAPE = 1,5% e BIAS = 0,30) e valores altos de parâmetros de classificação, tais como o critério d e o índice c ( $d = 0,96$  e  $c = 0,92$ ), sendo classificado como excelente segundo tais critérios. Para próximos trabalhos, sugere-se o uso de equações semi-empíricas e tratamentos mais adequados, que levem em conta parametrizações locais, uma vez que as constantes e equações utilizadas por Salvadori et al. (2019) são generalistas.

Uma vez validado, o MGeA foi utilizado para estimar D-UVE em três situações relacionadas a intervalos de tempo durante um dia. Nas primeiras horas do dia (situação 1, entre

6h e 10h) a D-UV<sub>E</sub> foi mais intensa na orientação leste, na qual o Sol está nascendo e se posicionando em relação ao horizonte. Na situação 2, que considerou uma hora de exposição em torno do meio-dia solar, tem-se que os valores observados com a face voltada para o sul são significativamente maiores do que em relação ao norte, tendo em vista a posição do Sol neste horário. Também, os fluxos de radiação em superfícies inclinadas em  $\beta = 30^\circ$  são mais altos do que nas superfícies verticais, pois, em  $\beta = 90^\circ$ , a componente direta tende a zero, prevalecendo, deste modo, somente a componente difusa. Por fim, considerando a situação 3, de uma exposição de dia inteiro, observou-se que, mesmo no inverno, há riscos de danos à saúde para indivíduos de todos os fototipos.

Esses resultados alertam quanto a necessidade de utilização de fotoproteção ao longo de todo o ano, mesmo nas exposições cotidianas. No Brasil, em específico, em Natal e São Paulo a disponibilidade solar é alta durante todo o ano. No entanto, as campanhas de fotoproteção ainda não são eficientes, sendo necessário propor alternativas e políticas públicas que visem a conscientização e, até mesmo, distribuição de protetor solar (CORRÊA et al., 2023).

Como trabalhos futuros, sugere-se o aperfeiçoamento do MGeA, que considere equações empíricas e metodologias adaptadas a qualquer local do globo, bem como um aprimoramento de coeficientes e constantes, a fim de tornar o modelo não só operacional, mas, também, criterioso quanto ao passo a passo nos cálculos das componentes e parâmetros relacionados à incidência de RUV.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADDOR, F. A. S., BARCAUI, C. B., GOMES, E. E., LUPI, O., MARÇON, C. R., MIOT, H. A. Sunscreen lotions in the dermatological prescription: review of concepts and controversies. **Anais Brasileiros de Dermatologia**, v. 97, n. 2, p. 204-222, 2022.
- ARAUJO, T. S.; SOUZA, S. O. Protetores solares e os efeitos da radiação ultravioleta. **Scientia Plena**, v. 4, n.11, p. 1-14807, 2008.
- ARMS, S.; CHASTANG, J.; GROVER, M.; THIELEN, J.; WILSON, M.; DIRKS, D. Introducing Students to Scientific Python for Atmospheric Science. **American Meteorological Society**, v. 101, n.9. p. E1492–E1496, 2020.
- BACKES, C.; RELIGI, A.; MOCCOZET, L.; BEHAR-COHEN, F.; VUILLEUMIER, L.; BULLIARD, J. L.; VERNEZ, D. Sun exposure to the eyes: predicted UV protection effectiveness of various sunglasses. **Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology**, v. 29, p. 753–764, 2019.
- BAO, F.; LI, M.; ZHANG, Y.; CHEN, C.; ZHAO, J. Photochemical Aging of Beijing Urban PM<sub>2.5</sub>: HONO Production. **Environmental Science & Technology**, v. 52, n. 11, p. 6309-6316, 2018.
- BOLAND, J.; SCOTT, L.; LUTHER, M. Modelling the diffuse fraction of global solar radiation on a horizontal surface. **Environmetrics**, v. 12, n. 2, p. 103–116, 2001.
- CADET, J. M.; BENCHERIF, H.; CADET, N.; LAMY, K.; PORTAFAIX, T.; BELUS, M.; BROGNIEZ, C.; AURIOL, F.; METZGER, J. M.; WRIGHT, C. Y. Solar UV Radiation in the Tropics: Human Exposure at Reunion Island (21° S, 55° E) during Summer Outdoor Activities. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 17, p. 8105, 2020.
- CALBÓ, J.; PAGÉS, D.; GONZÁLEZ, J. A. EMPIRICAL STUDIES OF CLOUD EFFECTS ON UV RADIATION: A REVIEW. **Reviews of Geophysics**, v.43, p. 1-28, 2005.
- CIE - International Commission on Illumination. STANDARD ERYTHEMA DOSE, A REVIEW. CIE. **Technical Report**. 7 p. 1997.
- COARITI, J. R. **Características da Radiação Ultravioleta Solar e seus efeitos na saúde humana nas cidades de La Paz – Bolívia e Natal – Brasil**. 2017, 110 f. Tese (Doutorado em Ciências Climáticas) – Universidade Federal de Rio Grande do Norte, 2017.
- CORRÊA, M. P. Solar ultraviolet radiation: properties, characteristics and amounts observed in Brazil and South America. **Anais Brasileiros de Dermatologia**, v.90, n.3. p. 297-313, 2015.
- CORRÊA, M. P. ; MARCIANO, A. G.; CARVALHO, V. S. B. ; SOUZA, P. M. B. ; RIPPER, J. S. C. ; ROYC, D. ; BRETON, L. ; DE VECCHI, R. Exposome extrinsic factors in the tropics: The need for skin protection beyond solar UV radiation. **Science of the Total Environment**, v. 782, p. 146921, 2021. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.146921.

CORRÊA, M. P.; BOLZAN, F. M.; YAMAMOTO, A. L. C.; PAIVA, N. B.; SILVA, L. F.; SOUZA, R. J. S. P.; MELO, M. M.; RIBEIRO, C. S. C. Lack of Knowledge and Misperceptions on Photoprotection among Brazilian Youngsters. **Dermato**, v. 3, p. 1-12, 2023.

CORRÊA, M. P.; CEBALLOS, J. C. UVB SURFACE ALBEDO MEASUREMENTS USING BIOMETERS. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 26, n. 4, p. 411-416, 2008.

CORRÊA, M. P.; PIRES, L. C. M. Doses of erythemal ultraviolet radiation observed in Brazil. **International Journal of Dermatology**, v.52, n.8, p.966-973, 2013.

D'ORAZIO, J.; JARRETT, S.; AMARO-ORTIZ, A.; SCOTT, T. UV Radiation and the Skin. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 14, p. 12222-12248, 2013.

DIFFEY, B. L. Solar ultraviolet radiation effects on biological systems. **Review in Physics in Medicine and Biology**, v. 36, n. 3, p. 299-328, 1991.

DIFFEY, B. L. Sources and measurement of ultraviolet radiation. **Methods**, v. 28, p. 4-13, 2002.

DUTHIE, M. S. et al. The effects of ultraviolet radiation on the human immune system. **British Journal of Dermatology**, v. 140, p. 995-1009, 1999.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia (UFPA)**, v. 35, n.6, p. 1039-1042, 2011.

FITZPATRICK, T. The validity and practicality of sun reactive skin types I through VI. **Archives of Dermatology**, v.124, p.869-871, 1988.

GAO, W.; GRANT, R. H.; HEISLER, G. M.; SLUSSER, J. R. A Geometric Ultraviolet-B Radiation Transfer Model Applied to Vegetation Canopies. **Agronomy Journal**, v. 94, p. 475-482, 2002.

GOPINATHAN, K. K. et al. A study on the intercepted insolation as a function of slope and azimuth of the surface. **Energy**, v. 32, p. 213-220, 2007.

GRONCHIL, C. C.; CALDAS, L. V. E. PTOSL response of commercial Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:C detectors to ultraviolet radiation. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 154, n. 1, p. 117–120, 2013.

GUGLIERMETTI, L.; BURATTINI, C.; BISEGNA, F.; MILITELLO, A.; BORRA, M. Study on the positioning of a smart sensor for the assessment of UV radiation exposure in outdoor workers. **IEEE Xplore**, p. 1-4, 2019. DOI: 10.1109/EEEIC.2019.8783346.

GUO, H. ANALYSIS OF SOLAR PANEL EFFICIENCY THROUGH COMPUTATION AND SIMULATION. **International Journal of Modern Engineering**, v. 12, n. 2, p. 45-52, 2012.

HAFEZ, A. Z.; SOLIMAN, A.; EL-METWALLY, K. A.; ISMAIL, I. M. Tilt and azimuth angles in solar energy applications – A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 77, p. 147-168, 2017.

HOEL, D. G. et al. The risks and benefits of sun exposure 2016. **Dermato-Endocrinology**, v.

8, n. 1, p. e1248325, 2016.

HOEL, D. G.; GRUJIL, F.R. Sun Exposure Public Health Directives. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v.15, n.12, p.2794-2799, 2018.

HOEPPE P.; OPPENRIEDER A.; ERIANTO C.; KOEPKE P.; REUDER J.; SEEFELDNER M.; NOWAK D. Visualization of UV exposure of the human body based on data from a scanning UV-measuring system. **International Journal of Biometeorology**, v. 49, p. 18-25, 2004.

HOLICK, M. F. Biological Effects of Sunlight, Ultraviolet Radiation, Visible Light, Infrared Radiation and Vitamin D for Health. **Anticancer Research**, v. 36, p. 1345-1356, 2016.

HOLICK, M. F. The Vitamin D Epidemic and its Health Consequences. **The Journal of Nutrition**, v. 135, n. 11, p. 2739S-2784S, 2005.

HOLICK, M. F. Vitamin D: A Millenium Perspective. **Journal of Cellular Biochemistry**, v. 88, p. 296-307, 2003.

HOLLÓSY, F. Effects of ultraviolet radiation on plant cells. **Micron**, v. 33, n. 2, p. 179-197, 2002.

IANETZ, A.; KUDISH, A. A Method for Determining the Solar Global and Defining the Diffuse and Beam Irradiation on a Clear Day. **Modeling Solar Radiation at the Earth's Surface**, p. 93-113, 2008.

ICNIRP - International Commission of Non-Ionizing Radiation Protection. Guidelines on limits of exposure to ultraviolet radiation of wavelength between 180 nm and 400 nm (incoherent optical radiation). **Health Physics**, v.87, p.171-1866, 2004.

ICNIRP - International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Statement on protection of workers against ultraviolet radiation. **Health Physics**. V. 99, p. 66-87, 2010.

INCA – Instituto Nacional de Câncer José Alencar Gomes da Silva. Tipos de câncer, pele melanoma, 2021. Disponível em: <https://www.inca.gov.br/tipos-de-cancer/cancer-de-pele-melanoma>. Acesso em: 10 de fevereiro de 2022.

INCA – Instituto Nacional de Câncer José Alencar Gomes da Silva. Tipos de câncer, pele não melanoma, 2021. Disponível em: <https://www.inca.gov.br/tipos-de-cancer/cancer-de-pele-nao-melanoma>. Acesso em: 10 de fevereiro de 2022.

JAIN, D.; LALWANI, M. A Review on Optimal Inclination Angles for Solar Arrays. **International Journal of Renewable Energy Research**, v. 7, n. 3, 2017.

KAFKA, J. A.; MILLER, M. A. A climatology of solar irradiance and its controls across the United States: Implications for solar panel orientation. **Renewable Energy**, v. 135, p. 897-907, 2019.

KHATIB, T.; MOHAMED, A.; SOPIAN, K. A review of solar energy modeling techniques. **Renewable and Sustainable Energy Rewies**, v. 16, p. 2864-2669, 2012.

KIRCHHOFF, V. W. J. H.; ECHER, E. LEME, N. P. SILVA, A. A. A Variação Sazonal da Radiação Ultravioleta Solar Biologicamente Ativa. **Brazilian Journal of Geophysics**, v. 18, n. 1, p. 63-74, 2000.

KIVALOV, S. N. Improved ray tracing air mass numbers model. **Applied Optics**, v. 46, n. 29, p. 7091-7098, 2007.

LAVEYNE, J. I. Impact of Solar Panel Orientation on the Integration of Solar Energy in Low-Voltage Distribution Grids. **International Journal of Photoenergy**, v. 2020, p. 2412780, 2020.

LIU, K. N. Chapter 6 - Principles of Radiative Transfer in Planetary Atmospheres. **International Geophysics**, v. 84, p. 257-347, 2002.

LIU, B. Y. H.; JORDAN, R. C. The Interrelationship and of Direct, Diffuse and Characteristic Distribution Total Solar Radiation. **Solar Energy**, v. 4, n. 3, p. 1-19, 1960.

MADRONICH, S. Implications of recent total atmospheric ozone measurements for biologically active ultraviolet radiation reaching the Earth's surface. *Geophysical Research Letters*, v. 19, n. 1, p. 37-40, 1992.

MADRONICH, S. UV radiation in the natural and perturbed atmosphere, UV-B Radiation and Ozone Depletion, Effects on Humans, Animals, Plants, Microorganisms, and Materials M. Tevini, Ed., **Lewis Publishers**, p. 17-69, 1993.

MAEDA, S. S.; SARAIVA, G. L.; HAYASHI, L. F.; CENDOROGLIO, M. S.; RAMOS, L. R.; CORRÊA, M. P.; MESQUITA, C. H.; CASTRO, M. L. Seasonal variation in the serum 25hydroxyvitamin D levels of young and elderly active and inactive adults in São Paulo, Brazil. *Dermato-Endocrinology*, v. 5, n. 1, p. 211-217, 2013.

MAHÉ, E.; BEAUCHET, A.; CORRÊA, M. P.; GODIN-BEEKMANN, S.; HAEFFELIN, M.; BRUANT, S.; FAY-CHATELARD, F.; JÉGOU, F.; SAIAG, P.; AEGERTER, P. Outdoor sports and risk of UV-related skin lesions in children: evaluation of risks, and prevention. **British Journal of Dermatology**, v. 165, p. 360-367, 2011.

MAYER, B.; KYLLING, A. The libRadtran software package for radiative transfer calculations-description and examples of use. **Atmospheric Chemistry and Physics**, **Katlenburg-Lindau**, v. 5, n. 7, p. 1855-1877, 2005.

MC KINLAY, A. F.; DIFFEY, B. L. A reference spectrum for ultraviolet induced erythema in human skin. **CIE Journal**, v. 6, p. 17-22, 1987.

MEYERS C. et al. UVC radiation as an effective disinfectant method to inactivate human papillomaviruses. **PLoS ONE**, v. 12, n. 10, p. e0187377, 2017.

MICHELINI, Z.; MAZZEI, C.; MAGURANO, F.; BAGGIERI, M.; MARCHI, A.; ANDREOTTI, M.; CARA, A.; GAUDINO, A.; MAZZALUPI, M.; ANTONELLI, F.; SOMELLA, L.; ANGELETTI, S.; RAZZANO, E.; RUNGE, A.; PETRINCA, P. UltraViolet SANitizing System for Sterilization of Ambulances Fleets and for Real-Time Monitoring of Their Sterilization Level. **International Journal of Environmental Research and Public**

**Health**, v. 9, n. 331, 2022.

MODENESE, A.; BISEGNA, F.; BORRA, M.; BURATTINI, C.; GUGLIERMETTI, L.; FILON, F.L.; MILITELLO, A.; TOFFANIN, P.; GOBBA, F. Occupational Exposure to Solar UV Radiation in a Group of Dock-workers in North-East Italy. **IEEE Xplore**, p. 1-6, 2020.

MODENESE, A.; RUGGIERI, F.P.; BISEGNA, F.; BORRA, M.; BURATTINI, C.; DELLA VECCHIA, E.; GRANDI, C.; GRASSO, A.; GUGLIERMETTI, L.; MANINI, M.; MILITELLO, A.; GOBBA, F. Occupational Exposure to Solar UV Radiation of a Group of Fishermen Working in the Italian North Adriatic Sea. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 16, n. 3001, 2019.

MOEHRLE, M.; DENNENMOSER, B.; GARBE, C. Continuous Long-Term Monitoring of Uv Radiation In Professional Mountain Guides Reveals Extremely High Exposure. **International Journal of Cancer**, v. 103, n. 6, p. 775-778, 2003.

MOLDOVAN, H. R.; WITTLICH, M.; JOHN, S. M.; BRANS, R.; TIPLICA, G. S.; SALAVASTRU, C.; VOIDAZAN, S. T.; DUCA, R. C.; FUGULYAN, E.; HORVATH, G.; ALEXA, A.; BUTACU, A. I. Exposure to solar UV radiation in outdoor construction workers using personal dosimetry. **Environmental Research**, v. 181, p. 108967, 2019.

MONTEIRO, A. F. M., MARTINS, F. B. Global Solar Radiation Models in Minas Gerais, Southeastern Brazil. **Advances in Meteorology**, v. x, 17 pp., 2019.

NORVAL, M. et al. The human health effects of ozone depletion and interactions with climate change. **Photochemical & Photobiological Sciences**, v. 10, n. 2, p. 199-225, 2011.

OLIVA, M. S.; TAYLOR, R. A. C. Ultraviolet Radiation and the Eye. **International Ophthalmology Clinics**, v. 45, n. 1, p. 1-17, 2005.

OLIVEIRA, P. R.; OLIVEIRA, A. C.; OLIVEIRA, F.C. A radiação ultravioleta e as lentes fotocromicas. **Arquivo Brasileiro de Oftalmologia**, v. 64, p. 163-165, 2001.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE – OMS. **Global Solar UV Index**. Practical Guide. 2003.

OWUSU, NANA OBAAYAA. Solar Ultraviolet (UV) Radiation Exposure in an Eastern North Carolina Outdoor Working Environment During Cold Months (2022). Tese (Mestrado) – Mestrado em Saúde Ambiental. Universidade da Carolina do Norte, Chicago.

PEREZ, R.; SEALS, R.; INEICHEN, R.; STEWART, R.; MENICUCCI, D. A new simplified version of the Perez diffuse irradiance model for tilted surfaces. **Solar Energy**, v. 39, p. 221-231, 1987.

REINDL, D.T.; BECKMAN, W.A.; DUFFIE, J.A. Diffuse fraction correlations. **Solar Energy**, v. 45, p. 1-7, 1990.

RELIGI, A.; BACKES, C.; CHATELAN, A.; BULLIARD, J. L.; VUILLEUMIER, L.; MOCCOZET, L.; BOCHUD, M.; VERNEZ, D. Estimation of exposure durations for vitamin D production and sunburn risk in Switzerland. **Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology**, v. 29, p. 742-752, 2019.

RELIGI, A.; MOCCOZET, L.; VERNEZ, D.; MILON, A.; BACKES, C.; BULLIARD, J. L.; BACKES, C.; VUILLEUMIER, L. Prediction of anatomical exposure to solar UV: a case study for the head using SimUVEx v2. **IEEE Healthcorn**, 2016.

RIBEIRO-OLIVEIRA, J. P. et al. Data transformation: an underestimated tool by inappropriate use. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 40, n. 1, p. e35300, 2018.

RICCHIAZZI, P. et al. SBDART: A Research and Teaching Software Tool for Plane-Parallel Radiative Transfer in the Earth's Atmosphere. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 79, n. 10, 1998.

RUALES, M. F. C. et al. UVR Exposure and Prevention of Street Construction Workers in Colombia and Germany. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 19, p. 7259-7279, 2022.

RYDZ, E.; HARPER, A.; LEONG, B.; ARRANDALE, V. H.; KALIA, S.; FORSMAN-PHILLIPS, L.; HOLNESS, D. L.; TENKATE, T.; PETERS, C. E. Solar ultraviolet radiation exposure among outdoor workers in Alberta, Canada. **Environmental Research**, v. 189, p. 109902, 2020.

SABBURG, J. M.; PARISI, A. V. Spectral dependency of cloud enhanced UV irradiance. **Atmospheric Research**, v. 81, p. 206-214, 2006.

SALVADORI, G.; LISTA, D.; BURATTINI, G.; GUGLIERMETTI, L.; LECCESE, F.; BISEGNA, F. Sun Exposure of Body Districts: Development and Validation of an Algorithm to Predict the Erythematous Ultra Violet Dose. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 16, p. 3632, 2019.

SANCHEZ, G.; SERRANO, A.; CANCELLO, M. L. Modeling the erythematous surface diffuse irradiance fraction for Badajoz, Spain. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 17, p. 12697–12708, 2017.

SANTOS, S. O.; SOBRINHO, R. R.; OLIVEIRA, T. A. Importância do uso de protetor solar na prevenção do câncer de pele e análise das informações desses produtos destinados a seus usuários. **Journal Health Biology Science**, v. 6, n. 3, p. 279-285, 2018.

SARAIVA, G. L.; CENDOROGLIO M. S.; RAMOS, L. R.; ARAÚJO, L. M. Q.; VIEIRA, J. G. H.; KUNII, I.; HAYASHI, L. F.; CORRÊA, M. P.; CASTRO, M. L. Influence of ultraviolet radiation on the production of 25 hydroxyvitamin D in the elderly population in the city of São Paulo (23°O 34'S), Brazil. **Osteoporos International**, v. 16, p. 1649-1654, 2005.

SCHALKA, S. et al. A novel method for evaluating sun visible light protection factor and pigmentation protection factor of sunscreens. **Clinical, Cosmetic and Investigational Dermatology**, v. 12, p. 605-616, 2019.

SCHALKA, S.; STEINER, D.; RAVELLI, F. N.; STEINER, T.; TERENA, A. C.; MARCON, C. R., et al. Brazilian Consensus on Photoprotection. **Anais Brasileiros de Dermatologia**, v. 89, n. 6, 76 p, 2014.

SCHMALWIESER, A. W. et al. Modeling acute and cumulative erythematous sun exposure

on vulnerable body sites during beach vacations utilizing behavior-encoded 3D body models. **Photochemical & Photobiological Sciences**, v.22, p. 1-26, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s43630-022-00293-1>.

SCHMALWIESER, A. W. Possibilities to estimate the personal UV radiation exposure from ambient UV radiation measurements. **Photochemical & Photobiological Sciences**, v. 10, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1039/D0PP00182A>.

SERRANO, M.A.; CAÑADA, J.; MORENO, J.C. Erythemat Ultraviolet Exposure in two Groups of Outdoor workers in Valencia, Spain. **Photochemistry and Photobiology**, v. 85, p. 1468–1473, 2009.

SIANI, A.M.; CASALE, G.R.; SISTO, R.; COLOSIMO, A.; LANG, C.A.; KIMLIN, M.G. Occupational Exposures to Solar Ultraviolet Radiation of Vineyard Workers in Tuscany (Italy). **Photochemistry and Photobiology**, v. 87, p. 925–934, 2011.

SIM - Atlas de Mortalidade por Câncer, 2020. Disponível em: <https://www.inca.gov.br/app/mortalidade>. Acesso em: 30 de setembro de 2022.

SINGH, H.; BHARDWAJ, S.K.; KHATRI, M.; KIM, K-H.; BHARDWAJ, N.; UVC radiation for food safety: An emerging technology for the microbial disinfection of food products. **Chemical Engineering Journal**, v. 417, p. 128084, 2021.

SOUZA ECHER, M. P.; MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B. A importância dos dados de cobertura de nuvens e de sua variabilidade: Metodologias para aquisição de dados. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 28, n. 3, p. 341-352, 2006.

SOUZA, A. P., SILVA, A. C., TANAKA A. A. et al., Global radiation by simplified models for the state of Mato Grosso, Brazil, **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 52, n. 4, p. 215–227, 2017.

STORCK, L.; LOPES, S. J.; DAL'CO LUCIO, A. Experimentação II. Santa Maria: UFSM, CCR, Departamento de Fitotecnia, 2004. 3.ed. 207p.

TEMPS, R. C.; COULSON, K. L. SOLAR RADIATION INCIDENT UPON SLOPES OF DIFFERENT ORIENTATIONS. **Solar Energy**, v. 19, p. 179-184, 1977.

TSAI, J.; CHIEN, A. L. Photoprotection for Skin of Color. **American Journal of Clinical Dermatology**, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40257-021-00670-z>.

TURNER, J.; PARISI, A. V. TURNBULL, D. J. Reflected solar radiation from horizontal, vertical and inclined surfaces: Ultraviolet and visible spectral and broadband behaviour due to solar zenith angle, orientation and surface type. **Journal of Photochemistry and Photobiology**, v. 92, n. 1, p. 29-37, 2008.

TURNER, J.; PARISI, A. V. Ultraviolet Radiation Albedo and Reflectance in Review: The Influence to Ultraviolet Exposure in Occupational Settings. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 15, p. 1507-1528, 2018.

UTRILLAS, M. P. et al. Diffuse UV erythemat radiation experimental value. **Journal of**

**Geophysical Research**, v. 112, p. D24207, 2007.

VECCHI, R.; RIPPER, J. S. C.; ROY, D.; BRETON, L.; MARCIANO, A. G.; SOUZA, P. M. B.; CORRÊA, M. P. Using wearable devices for assessing the impacts of hair exposome in Brazil. **Nature Research**, v. 9, p. xx, 2019.

VERNEZ, D.; MILON, A.; FRANCIOLI, L.; BULIARD, J. L.; VUILLEUMIER, L.; MOCCOZET, L. A Numeric Model to Simulate Solar Individual Ultraviolet Exposure. **Photochemistry and Photobiology**, v. 87, p. 721-728, 2011.

WALSH, K. UV Radiation and the Eye. **Optician**, v.237, p.26-33, 2009.

XU, J. et al. Photochemical impacts on the toxicity of PM2.5. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, 2020. DOI: 10.1080/10643389.2020.1816126.

YAMAMOTO, A. L. C.; REBOITA, M. S.; CORRÊA, M. P. Conhecendo as diferentes faces do ozônio. **Terræ Didática**, v. 17, p. e021036, 2021. DOI: 10.20396/td.v17i00.8666858.

YAMASOE, M. A.; CORRÊA, M. P. Processos radiativos na atmosfera (Fundamentos). São Paulo: Oficina de Textos, 2016. 142 p.

YOUNG, A. R. Acute effects of UVR on human eyes and skin. **Progress in Biophysics and Molecular Biology**, v. 92, n.1, p. 80-85, 2006.

YU, J. et al. Distributions of Direct, Reflected, and Diffuse Irradiance for Ocular UV Exposure at Different Solar Elevation Angles. **PLoS ONE**, v. 11, n.11, p. e0166729, 2016.

YU, S-L.; LEE, S-K. Ultraviolet radiation: DNA damage, repair, and human disorders. **Molecular & Cellular Toxicology**, v. 13, p. 21–28, 2017. DOI: 10.1007/s13273-017-0002-0.

ZHANG, J. et al. Uma revisão crítica dos modelos usados para estimar a radiação solar. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 70, p. 314–329, 2017.

ZHANG, M.; QURESHI, A. A.; GELLER, A. C.; FRAZIER, L.; HUNTER, D. J. et al. Use of tanning beds and incidence of skin cancer. **Journal of Clinical Oncology**, v. 30, n. 14, p. 1588, 2012.



## ANEXO A

```
##### MODELO GEOMÉTRICO DE TRANSFERÊNCIA RADIATIVA SALVADORI ET AL
(2019) #####
import math
import numpy as np
from math import e
import csv
import pandas as pd
### input and output files
saida = pd.DataFrame() # output file
df = pd.read_csv("input.csv", sep=";") #Reading .csv input -> TUV data
lin = df.shape[0]
cols = df.shape[1]
df
# Constants
pi = float(math.pi)
lat = -22.4 # lat [°]: Latitude
lon = -45.4 # lon [°]: Longitude
alb = 0.011 # alb: ground albedo in the UV wavelengths
texp = 600 # texp [s]: time of exposure of the investigated surface be
tween the instant ti and the instant ti+1

# Code
#Gama(°): azimuth angle (angle between the perpendicular projection on a
horizontal plane
# of the investigated surface and the south direction, positive in the d
irection from south to west)
for gama in np. arange(-90, 181, 90):
    for beta in np.arange(0, 91, 15): # Beta(°): inclination angle (an
gle between the horizontal and the investigated surface)
        for j in np.arange(0,lin,1):
            # Geometrical features
            latrd = math.radians(lat)
            lonrd = math.radians(lon)
            betard = math.radians(beta)
            gamard = math.radians(gama)
            DOY = df['DOY'].values[j] #DOY - dia do ano
            TOC = df['TOC'].values[j] # TOC - total ozone content [DU]
            sza = df['SZA'].values[j] # sza: solar zenith angle (°)
            UT = df['hour'].values[j] # UT: Universal Time
            omega = 2*pi*((DOY-
1)/365) # Omega: angle(rad) - Earth orbit
            decl = ((360/(2*pi))*(0.006918-0.399912*math.cos(omega)
+0.070257*math.sin(omega)-0.006758*math.cos(2*omega)
+0.000907*math.sin(2*omega)-0.002697*math.cos(3*omega)
+0.00148*math.sin(3*omega))) # Solar declination(°)
            declrd = math.radians(decl) # Solar declination(rad)
```

```

cd = (1.00011+0.034221*math.cos(omega)
+0.00128*math.sin(omega)+0.000719*math.cos(2*omega)
+0.000077*math.sin(2*omega)) # Earth-
Sun distance correction (rad)
et = ((24/(2*pi))* (0.000075+0.001868*math.cos(omega)
-0.032077*math.sin(omega)-0.014615*math.cos(2*omega)
-
0.04089*math.sin(2*omega))) # et: equation of time
ang_hor = (UT+(lon/15)-(12-
et))*360/24 # ang_hor: hour angle (°)
ang_horrd = math.radians(ang_hor) # ang_horrd: hour angle(
rad)
t_sa = UT+et+(lon-15)/15 #t_sa : True solar time
cos_theta = (math.cos(latrd)*math.cos(declrd)*math.cos(ang_horrd)
+math.sin(latrd)*math.sin(declrd))
thetard = math.acos(cos_theta)
theta = math.degrees(thetard) # theta = SZA: solar zenith an
gle (°)
sen_alpha = cos_theta # alpha: elevation of the Sun
alphard = math.asin(sen_alpha)
alpha = math.degrees(alphard)
thetazrd = 2*pi*((90-
alpha)/360) # thetaz: solar zenith angle (radiano)
thetaz = math.degrees(thetazrd)
cos_thetaz = math.cos(thetazrd)
gamma_srd = (math.asin(math.cos(declrd)
*math.sin(ang_horrd)/math.cos(alphard))) # Gama_s: solar azimuth
angle
gamma_s = math.degrees(gamma_srd)

# Radiative features
Ierh = df['UVE'].values[j] # Ierh: Erythemal UV irradiance on a
horizontal surface (W/m²)
IerhTOP = df['UVE0'].values[j] # IerhTOP: Erythemal UV irradiance
at the top of the atmosphere (W/m²)
Eh = (df['Eh0'].values[j])/cos_theta
ETOP = (df['ETOP0'].values[j])/cos_theta
#IerhTOP = ITOP*cd*cos_theta - Errado: antes era cd*et*cos_theta
if IerhTOP <= 0: # To avoid division by zero
kuv = 0
else:
kuv = Ierh/IerhTOP # kuv: UV clearness index
Ierdh = Ierh*(1.2-35.4*kuv+0.5*cos_theta-1.12*(10**-
3)*TOC) # Ierdh: diffuse component of the Erythemal UV irradiance on
a horizontal surface (W/m²)
Ierbh = Ierh-
Ierdh # Ierbh: direct component of the Erythemal UV irradiance on a
horizontal surface (W/m²)

```

```

    Fg = (1-math.cos(betard))/2      # Fg: view-
factor between the visible portion of the ground and the considered surf
ace
    IdAg = Ierh*alb*Fg              # IdAg: Erythemal UV irradiance re
flected from the ground (W/m²)
    a = max(0,(math.cos(thetard))) #a, b:coefficients considering the
angle of incidence of Sun rays on the investigated surface
    b = max(0.0872,(math.cos(thetazrd)))
    #EhTOP = ETOP*cd*cos_theta

EhTOP = ETOP*cos_theta
if EhTOP <= 0: # To avoid division by zero
    kt = 0
else:
    kt = Eh/EhTOP          # kt: Clearness index

x = (-5+8.6*kt)
if (x > 700 or x < 0):
    y = 1E50
else:
    y = (e**(x))
E_dh = Eh/(1+y)          #E_dh: diffuse component of the solar total ir
radiance on a horizontal surface (W/m²)
E_bh = Eh - E_dh        #E_bh: direct component of the solar total irr
adiance on a horizontal surface (W/m²)

eps = (((E_dh+(E_bh/sen_alpha))/E_dh)
+1.041*thetazrd**3)/(1+1.041*thetazrd**3) # eps = epsilon - co
efficient of transparency of the sky
if (eps > 1) and (eps <= 1.065):          # table 1 append 1
    f11 = -0.0083
    f12 = 0.5877
    f13 = -0.0621
    f21 = -0.0596
    f22 = 0.0721
    f23 = -0.0220
elif (eps > 1.065) and (eps <= 1.23):
    f11 = 0.130
    f12 = 0.683
    f13 = -0.151
    f21 = 0.019
    f22 = 0.066
    f23 = -0.029
elif (eps > 1.23) and (eps <= 1.5):
    f11 = 0.3297
    f12 = 0.4869
    f13 = -0.2211
    f21 = 0.0554
    f22 = -0.0640

```

```

    f23 = -0.0261
elif (eps > 1.5) and (eps <= 1.95):
    f11 = 0.5682
    f12 = 0.1875
    f13 = -0.2951
    f21 = 0.1089
    f22 = -0.1519
    f23 = -0.0140
elif (eps > 1.95) and (eps <= 2.8):
    f11 = 0.8730
    f12 = -0.3920
    f13 = -0.3616
    f21 = 0.2256
    f22 = -0.4620
    f23 = 0.0012
elif (eps > 2.8) and (eps <= 4.5):
    f11 = 1.1326
    f12 = -1.2367
    f13 = -0.4118
    f21 = 0.2878
    f22 = -0.8230
    f23 = 0.0559
elif (eps > 4.5) and (eps <= 6.2):
    f11 = 1.0602
    f12 = -1.5999
    f13 = -0.3589
    f21 = 0.2642
    f22 = -1.1271
    f23 = 0.1311
else:
    f11 = 0.6777
    f12 = -0.3273
    f13 = -0.2504
    f21 = 0.1561
    f22 = -1.3765
    f23 = 0.2506

if(alpha > 0):
    m = (1/(math.sin(alphard)
        +0.050572*(6.07995+ alpha)**(-1.6364))) #m: air optic mass
else:
    m = 0
#delta = m*(E_dh/(ETOP*cd)) # coefficient of brightness

delta = m*(E_dh/(ETOP)) # coefficient of brightness
F1_temp = f11+f12*delta+f13*thetazrd
fla = max(0,F1_temp)
if fla > 1:
    F1 = 1

```

```

else:
    F1 = f1a          # F1: coefficient for the circumsolar irradiance

F2_temp = f21+f22*delta+f23*thetazrd
f2a = max(0,F2_temp)
if f2a > 1:
    F2 = 1
else:
    F2 = f2a          # F2: coefficient for the horizon irradiance
IdAs = (Ierdh*((1-F1)
*(1+math.cos(betard))/2)
+F1*(a/b)+F2*math.sin(betard))) # IdAs: Erythemal UV irradiance d
iffused from the sky (W/m²)
cos_var_theta = (math.sin(alphard)*math.cos(betard)
+math.cos(alphard)*math.cos(gamma_srd-
gamard)*math.sin(betard)) # cos_var_theta: cosine of the angle of inci
dence of the Sun rays on the investigated surface (°)
aoi = math.degrees(math.acos(cos_var_theta))
if Ierbh < 0:
    Ierbh = 0
if cos_var_theta > 0:
    IbA = Ierbh*(cos_var_theta/sen_alpha)
else:
    IbA = 0          # direct component of Erythemal UV irradiance = 0
IA = IbA+IdAs+IdAg  #IA: Erythemal UV irradiance arriving on the
investigated surface (W/m²)
Ua = IA*texp       #Ua: Erythemal UV dose arriving on the inves
tigated surface during an exposure time of Δtexp (J/m²)
SED_a = Ua/100     #SED: Standard Erythemal Dose received by a
plane during the time of exposure Δtexp (J/m²)
UVI_a = 40*IA      #UVI_a: UV index
# Creating the output file
calcs = pd.DataFrame({
    'DOY': [DOY],
    'Hour': [UT],
    'Gama': [gama],
    'Beta': [beta],
    'SZA': [sza],
    'Theta': [theta],
    'UVI': [UVI_a],
    'SED': [SED_a],
    'Eps': [eps],
    'Decl': [decl],
    'Gama_s': [gamma_s],
    'kt': [kt],
    'aoi': [aoi],
    'aom': [m],
    'Ho': [ang_hor],
    'Ierdh': [Ierdh],

```

```

        'IdAs': [IdAs],
        'IdAg': [IdAg],
        'IbA': [IbA],
        'F1': [F1],
        'F2': [F2],
        'a': [a],
        'b': [b]
    })
    saida = pd.concat([saida,calcs], ignore_index=True)
saida.to_csv('resultados.csv')

```

## ANEXO B

**Tabela 01.** Coordenadas geográficas das cidades escolhidas para realização das simulações a partir do aprimoramento do modelo geométrico de Salvadori et al. (2019).

Cidade	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (m)
Nova Iorque	40.66	-73.94	10
Paris	48.8	2.35	35
Roma	41.89	12.49	21
Tóquio	35.69	139.69	40
Nova Deli	28.61	77.23	216
São Paulo	-23.55	-46.64	760
Natal	-5.79	-35.21	30
Buenos Aires	-34.61	-58.37	25
Sydney	-33.87	151.2	3
Cidade do Cabo	-33.93	18.43	13