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

Desenvolvimento e aplicação de uma métrica para avaliação atual e futura dos riscos ambientais à saúde da pele

Ivana Riera Pereira Bastos

Itajubá - MG, Brasil

2026

DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE UMA MÉTRICA PARA AVALIAÇÃO ATUAL E FUTURA DOS RISCOS AMBIENTAIS À SAÚDE DA PELE

por

Ivana Riera Pereira Bastos

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente e Recursos Hídricos, como parte das exigências obrigatórias para obtenção do título de Doutora em Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de concentração/Linha de pesquisa:
Meio Ambiente e Recursos Hídricos/Clima e Sustentabilidade

Orientador:
Dr. Marcelo de Paula Corrêa

Coorientadora:
Dra. Ana Letícia Campos Yamamoto

Itajubá - MG, Brasil

2026

Aos amores da minha vida:
Gabriel, Junior, Fabiana, Giovana & Renan
DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me capacitar e me sustentar em todos momentos para que pudesse chegar até aqui.

Ao meu marido, Gabriel, por todo apoio e por ser meu porto seguro. Sem você e nossas renúncias, eu jamais chegaria até aqui. Aos meus pais e irmãos, obrigada por sempre me incentivarem e acreditarem em mim.

Aos meus avós Edna e Ivan (sempre no coração), obrigada por se orgulharem de cada conquista minha. Sou muito mais feliz podendo compartilhar minhas alegrias com vocês.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Marcelo por todos os ensinamentos e oportunidade de desenvolvimento há quase 8 anos, desde a graduação. Obrigada por todo apoio e calma que você transmite. Também, agradeço a minha coorientadora, Prof. Dra. Ana Letícia, sempre solícita e pronta a ajudar, além de ser um exemplo de pesquisadora e mulher que levo para a vida.

Assim como no agradecimento da dissertação do mestrado, agradeço a "minha pessoa" na UNIFEI: Obrigada, Flávia, por dividir as alegrias, dores e loucuras de mais uma etapa. Seguimos juntas, ainda que nosso ciclo de UNIFEI tenha se encerrado.

Aos amigos queridos e demais familiares, com os quais divido a vida cotidiana, obrigada por cada demonstração de carinho que fizeram grande diferença ao longo da trajetória.

À Universidade Federal de Itajubá e corpo docente do Programa de Pós Graduação em Meio Ambiente e Recursos Hídricos pelo aprimoramento profissional.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro através da concessão da bolsa de estudo.

RESUMO

Bastos, Ivana Riêra Pereira Bastos. **Desenvolvimento e aplicação de uma métrica para avaliação atual e futura dos riscos ambientais à saúde da pele. 2026**. 90 p. Tese (Doutorado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Instituto de Recursos Naturais, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2026.

A exposição simultânea à radiação ultravioleta (RUV), ao estresse térmico e à poluição atmosférica implica em danos cumulativos para a saúde da pele, especialmente em um contexto de intensificação das mudanças climáticas e urbanização global. Apesar da relevância desses fatores ambientais para o expossoma da pele, as ferramentas atualmente disponíveis avaliam tais componentes de forma isolada, limitando a compreensão dos efeitos combinados e potencialmente sinérgicos das exposições ambientais cotidianas. Diante dessa lacuna, propõe-se o *Skin Environmental Exposure Score* (SEES), uma métrica inédita destinada à avaliação integrada dos riscos ambientais associados à saúde da pele. O SEES foi estruturado a partir da metodologia multicritério *Fuzzy Analytical Hierarchy Process* (F-AHP), permitindo determinar os pesos relativos dos riscos associados aos principais fatores ambientais associados ao dano cutâneo: índice ultravioleta (UVI), estresse térmico, representado pelo Humidex, ozônio troposférico (O_3), material particulado fino ($PM_{2.5}$) e outros gases atmosféricos. A formulação deste escore utilizou média geométrica ponderada, garantindo maior sensibilidade à ocorrência simultânea de condições ambientais extremas e evitando que exposições críticas fossem mascaradas por condições moderadas em outros fatores ambientais. As análises de sensibilidade demonstraram que o SEES é capaz de representar, de forma robusta, a intensificação do risco ambiental em cenários de exposição combinada. Em escala global, os resultados revelaram forte variabilidade espacial e sazonal dos riscos ambientais à saúde cutânea, com maiores escores observados em regiões tropicais e subtropicais, particularmente sob condições simultâneas de elevada RUV, calor extremo e degradação da qualidade do ar. Além disso, regiões urbanizadas e áreas de elevada altitude apresentaram maior vulnerabilidade ambiental devido à intensificação dos efeitos sinérgicos entre fatores atmosféricos e climáticos. Adicionalmente, esta tese avaliou os impactos futuros das mudanças climáticas sobre o expossoma da pele utilizando projeções do *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6* (CMIP6), sob o cenário SSP5-8.5, para os períodos de 2040–2050 e 2090–2100. Os resultados indicaram tendência consistente de aumento do SEES ao longo do século XXI, principalmente em regiões tropicais e subtropicais, associada à intensificação do estresse térmico e à persistência de condições atmosféricas favoráveis à degradação da qualidade do ar. Os resultados também evidenciaram a formação de *hotspots* ambientais em regiões densamente povoadas e com elevada vulnerabilidade climática, indicando que os impactos futuros do expossoma da pele não ocorrerão de maneira homogênea. De forma integrada, os resultados demonstram que as mudanças climáticas tendem a intensificar a frequência e a severidade de eventos ambientais compostos associados aos danos à saúde da pele, tornando cada vez mais necessária uma abordagem integrada de prevenção e adaptação. Nesse contexto, o SEES representa uma inovação metodológica na avaliação do expossoma extrínseco da pele, apresentando potencial aplicação em sistemas de alerta ambiental, estratégias de adaptação climática, políticas públicas de saúde, comunicação de risco e planejamento ambiental voltado à proteção da saúde humana.

Palavras-chave: Expossoma cutâneo; radiação ultravioleta; poluição atmosférica; estresse térmico; mudanças climáticas; Fuzzy AHP.

ABSTRACT

Bastos, Ivana Riêra Pereira Bastos**. Development and application of a metric for current and future assessment of environmental risks to skin health**. 2026. 90 p. Thesis (Doctorate in Environment and Water Resources) - Institute of Natural Resources, Federal University of Itajubá, Itajubá, 2026.

Simultaneous exposure to ultraviolet radiation (UVR), thermal stress, and air pollution represents a growing challenge for skin health, particularly within the context of intensifying climate change and global urbanization. Despite the relevance of these environmental factors to the skin exposome, currently available tools assess these components in isolation, limiting the understanding of the combined and potentially synergistic effects of daily environmental exposures. To address this gap, this thesis proposes the development of the Skin Environmental Exposure Score (SEES), a novel metric designed for the integrated assessment of environmental risks associated with skin health. The SEES was theoretically structured using the Fuzzy Analytical Hierarchy Process (F-AHP) multicriteria methodology to determine the relative weights of the primary environmental factors associated with cutaneous damage: ultraviolet index (UVI), thermal stress represented by the Humidex, tropospheric ozone (O_3), fine particulate matter ($PM_{2,5}$) and other atmospheric gases. The score's mathematical formulation utilized a weighted geometric mean, ensuring high sensitivity to the simultaneous occurrence of extreme environmental conditions and preventing critical exposures from being masked by moderate conditions in other environmental factors. Sensitivity analyses demonstrated that the SEES robustly represents the intensification of environmental risk under combined exposure scenarios. On a global scale, the results revealed strong spatial and seasonal variability in environmental risks to skin health, with the highest values observed in tropical and subtropical regions, particularly under simultaneous conditions of high UVR, extreme heat, and air quality degradation. Furthermore, urbanized areas and high-altitude regions exhibited greater environmental vulnerability due to the intensification of synergistic effects between atmospheric and climatic factors. Additionally, this thesis assessed the future impacts of climate change on the skin exposome using projections from the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) under the high-emission SSP5-8.5 scenario for the 2040–2050 and 2090–2100 periods. The results indicated a consistent increasing trend in the SEES throughout the 21st century, primarily in tropical and subtropical regions. This worsening of future risk is driven by the intensification of thermal stress and the persistence of atmospheric conditions favorable to air quality degradation, even amidst projections of stabilization or decline in surface UVR toward the end of the century. The future scenarios also evidenced the formation of environmental hotspots in densely populated regions with high climate vulnerability, indicating that the future impacts on the skin exposome will not occur homogeneously. Integrated, the findings demonstrate that climate change tends to increase the frequency and severity of compound environmental events associated with skin health, underscoring the growing necessity for an integrated approach to prevention and adaptation. In this context, the SEES represents a methodological innovation in the assessment of the extrinsic skin exposome, offering potential applications in environmental warning systems, climate adaptation strategies, public health policies, risk communication, and environmental planning aimed at protecting human health.

Keywords: Cutaneous exposome; ultraviolet radiation; atmospheric pollution; thermal stress; climate change; Fuzzy AHP.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I

Figura 1.1 - Níveis hierárquicos de comparação par a par (φ) para matrizes de comparação no AHP. 21

Figura 1.2 - Análise comparativa entre a variação do risco do UVI (KUV) e os fatores de risco do SEES 34

Figura 1.3 - Variação sazonal do *Skin Environmental Exposure Score* (SEES, na sigla em inglês) às 9h nos equinócios e solstícios de 2022 37

Figura 1.4 - Variação sazonal do *Skin Environmental Exposure Score* (SEES, na sigla em inglês) ao meio-dia nos equinócios e solstícios de 2022. 40

Figura 1.5 - Variação horária do *Skin Environmental Exposure Score* (SEES) em 09 de setembro nos anos de 2023 e 2024 em São Paulo, SP. O gráfico de barras (esquerda) mostra os valores do SEES entre às 8h e 17h, com as cores de fundo indicando as categorias de risco. O gráfico de radar (direita) mostra a contribuição individual de cada um dos fatores ambientais (UVI, Humidex, O_3, $PM_{2.5}$, e OG) no valor máximo do SEES observado nestas datas. 40

Figura 1.6 - Variação horária do *Skin Environmental Exposure Score* (SEES) em 17 de fevereiro de 2025 no Rio de Janeiro, RJ. O gráfico de barras (esquerda) mostra os valores do SEES entre às 8h e 17h, com as cores de fundo indicando as categorias de risco. O gráfico de radar (direita) mostra a contribuição individual de cada um dos fatores ambientais (UVI, Humidex, O_3, $PM_{2.5}$, e OG) no valor máximo do SEES observado nesta data. 41

CAPÍTULO II

Figura 2.1 - *Skin Environmental Exposure Score* (SEES) médio nos meses de junho e dezembro nos períodos histórico (1980 - 2014), futuro próximo (2040 - 2050) e distante (2090 - 2100) do século XXI sob o cenário SSP5-8.5. Todos os painéis foram elaborados considerando o *ensemble mean* dos Modelos do Sistema Terrestre. 62

Figura 2.2 - Análise de variação relativa (VR) projetada no *Skin Environmental Exposure Score* (SEES) médio anual nos períodos futuro próximo (2040 - 2050) e distante (2090 - 2100) do século XXI sob o cenário SSP5-8.5. Todos os painéis foram elaborados considerando o *ensemble mean* dos Modelos do Sistema Terrestre. 65

Figura 2.3 - Distribuição da variação relativa (VR) do SEES por bandas latitudinais para os meses de junho e dezembro, comparando os períodos 2040–2050 (cinza claro) e 2090–2100 (cinza escuro) em relação ao período histórico. As caixas indicam o intervalo interquartil (q1–q3), a linha central representa a mediana (p50) e as linhas verticais correspondem ao p5 e p95 do SEES. 69

Figura 2.4 - Tendência sazonal do *Skin Environmental Exposure Score* (SEES) para as cidades, ordenadas a partir da latitude: Nova Iorque, Paris, Xangai, Délhi, Lagos, Manaus, São Paulo, Joanesburgo e Sydney nos meses de março, junho, setembro e dezembro. As faixas coloridas indicam as classes de risco do SEES. 72

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO I

Tabela 1.1 - Comparações par a par de Saaty e escalas triangulares fuzzy (Li et al., 2009)...21
Tabela 1.2 - Terminologias Chave 24
Tabela 1.3 - Escala do Índice Ultravioleta e categorias de exposição (WHO, 2002). 25
Tabela 1.4 - Escala de faixa Humidex (ECCC, 2016).....26
Tabela 1.5 - Limites do Índice de Qualidade do Ar (AQI) (EPA, 2018). 27
Tabela 1.6 - Limiares de UVI, H e AQIi e o índice Ki correspondente. 28
Tabela 1.7 - Resultados da avaliação de sensibilidade das duas funções de agregação.....29
Tabela 1.8 - Limiares e classificação de risco com base nos valores de SEES.....32

CAPÍTULO II

Tabela 2. 1 - Variáveis e modelos climáticos utilizados neste estudo para simulação do clima presente e projeção do clima futuro.....54
Tabela 2. 2 - Variáveis e modelos climáticos utilizados neste estudo para validação do clima presente.....56
Tabela 2. 3 - Coordenadas geográficas das cidades do estudo.....59
Tabela 2. 4 - Resultado das métricas calculadas para avaliação de desempenho dos modelos. 60
Tabela 2. 5 - Avaliação integrada do desempenho dos ESMs baseada na normalização das métricas (BIAS, RQME e r), agregação multicritério e análise de consistência.....60

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CMIP6 - *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6*

CPNM - Câncer de pele não-melanoma

EPA - Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos

ERA5 - *Fifth generation of European Reanalysis*

F-AHP – Fuzzy *Hierarchy Analytical Process*

H – Humidex

K_H - coeficiente de risco a partir do Humidex

K_{O_3} - coeficiente de risco a partir da concentração de ozônio

K_{OG} - coeficiente de risco a partir da concentração de outros gases (dióxido de enxofre ou nitrogênio)

$K_{PM_{2.5}}$ - coeficiente de risco a partir da concentração de material particulado 2,5μm

K_{UVI} - coeficiente de risco a partir do Índice Ultravioleta

MERRA2 - *The Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2*

NO_2 - dióxido de nitrogênio

O_3 - ozônio

OG - outros gases

OMS – Organização Mundial de Saúde

PM - material particulado

$PM_{2,5}$ - material particulado 2,5μm

RC - razão de consistência

RUV - Radiação Ultravioleta

SO_2 - dióxido de enxofre

SSP - *Shared Socio-economic Pathways*

T - temperatura do ar (T)

TUV - *Tropospheric Ultraviolet and Visible Radiation Model*

UR - umidade relativa

UVI - Indice Ultravioleta

WHO - *World Health Organization*

λ_{max} - autovalor máximo

SUMÁRIO

PREÂMBULO 11
CAPÍTULO I 14
1.1. INTRODUÇÃO 14
1.2. MATERIAL E MÉTODOS 18
1.2.1. O Processo de Hierarquia Analítica Fuzzy (F-AHP) para determinar o peso de cada fator 18
1.2.2. Seleção da função de agregação 22
1.2.3. Desenvolvimento do Índice de Risco 24
1.2.3.1. Fatores de risco relacionados ao expossoma extrínseco da pele 24
1.2.3.2. Níveis hierárquicos de comparação pareada (φ), atribuição de pesos e aplicação do AHP 27
1.2.4. *The Skin Environmental Exposure Score (SEES)* 28
1.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO 31
1.3.1. Teste de sensibilidade e escala do SEES 31
1.3.2. Base de dados climáticos para aplicação do SEES 33
1.3.2.1. Base de dados global 33
1.3.1.2. Base de dados local 34
1.3.3. Aplicações 35
1.3.3.1. Variações sazonais e horárias globais do *Skin Environmental Exposure Score* (SEES) e interpretação dos riscos de exposição combinada 35
1.3.3.2. Avaliação e interpretação do Skin Environmental Exposure Score (SEES) durante episódios de poluição e estresse térmico 39
1.4. CONCLUSÕES 42
1.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 45
CAPÍTULO II 52
2.1. INTRODUÇÃO 52
2.2. MATERIAIS E MÉTODOS 54
2.2.1. Base de dados: simulações e projeções futuras 54
2.2.2. Validação das simulações do clima presente 55
2.2.3. Avaliação das mudanças projetadas 58
2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO 59
2.3.1. Avaliação de desempenho dos ESM's 59
2.3.2. Projeções futuras e análises 61
2.3.3. SEES ao longo do século em algumas das maiores cidades do mundo 70
2.4. CONCLUSÕES 73
2.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 74
APÊNDICE CAPÍTULO II 83
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS GERAL 89

PREÂMBULO

A pele é o maior órgão do corpo humano, fornecendo uma cobertura resistente que atua como a principal barreira entre os órgãos internos e o ambiente, protegendo contra agentes físicos, químicos e biológicos (Walker, 2022; Hofmann et al., 2023). Dentre os fatores ambientais, a radiação ultravioleta (RUV), o estresse térmico e os poluentes representam as principais ameaças à pele, interagindo com a barreira cutânea e ocasionando inflamações, estresse oxidativo e doenças degenerativas (Marrot, 2018; Sozener et al., 2020; Chen et al., 2021; Fitoussi et al., 2022).

A exposição prolongada à RUV está associada a queimaduras solares, fotoenvelhecimento precoce, caracterizado principalmente por rugas e manchas cutâneas, inflamação ocular e câncer de pele devido aos danos ao DNA celular (Chang et al., 2010; D'Orazio et al., 2013; Rittié; Fisher, 2015). De acordo com o *World Cancer Research Found International*, o câncer de pele não-melanoma (CPNM) é o 5º tipo de câncer mais comum em todo o mundo, seguido pelo melanoma em 17º (Kurva et al., 2024). No Brasil, o CPNM é o mais prevalente, representando quase 1/3 dos novos casos de câncer diagnosticados no país. Para o triênio 2026-2028, espera-se, para cada ano, mais de 260 mil novos casos de CPNM (INCA, 2026).

Além da RUV, a poluição atmosférica também desempenha papel relevante na degradação da saúde da pele. Poluentes atmosféricos como material particulado (PM_1 e $PM_{2.5}$), ozônio (O_3), dióxido de enxofre (SO_2) e dióxido de nitrogênio (NO_2) induzem estresse oxidativo e inflamação, contribuindo para envelhecimento precoce, agravamento de doenças cutâneas e danos estruturais à pele e aos cabelos, podendo ainda atuar de forma sinérgica com a RUV (Baudouin et al., 2002; Ferrara et al., 2021).

Adicionalmente, condições de estresse térmico resultantes da interação entre temperatura do ar (T) e umidade relativa (UR) influenciam diretamente a homeostase cutânea, uma vez que o calor excessivo e a baixa umidade favorecem o ressecamento e a irritação, enquanto elevada umidade pode agravar dermatoses inflamatórias (Xu et al., 2008; Zhao et al., 2021).

Nas últimas décadas, a crescente preocupação com os efeitos ambientais sobre a saúde humana impulsionou o desenvolvimento do conceito de expossoma, originalmente proposto por Wild (2005). O expossoma corresponde ao conjunto total de exposições ambientais ao longo da vida, abrangendo fatores físicos, químicos, biológicos e comportamentais, bem como suas interações com mecanismos biológicos internos. Posteriormente, esse conceito foi

incorporado à dermatologia por Krutmann et al. (2017), por meio da definição de "*skin aging exposome*", enfatizando os fatores externos, internos e suas interações capazes de modular processos biológicos cutâneos e contribuir para o desenvolvimento de alterações estruturais e doenças da pele. Embora o conceito de expossoma reconheça a atuação simultânea de múltiplos fatores ambientais, a maior parte das abordagens metodológicas disponíveis ainda avalia esses componentes de maneira isolada. Em geral, índices de RUV, métricas de qualidade do ar e indicadores térmicos são analisados independentemente, desconsiderando possíveis efeitos aditivos ou sinérgicos decorrentes da exposição simultânea a diferentes estressores ambientais. Essa limitação metodológica pode resultar na subestimação do risco ambiental real associado à saúde da pele (Corrêa et al., 2021; Krutmann et al., 2021).

Diante desse contexto, torna-se evidente a necessidade de metodologias capazes de integrar múltiplos fatores ambientais em uma única métrica representativa da exposição cutânea. Assim, esta tese propõe o desenvolvimento do *Skin Environmental Exposure Score* (SEES), configurando uma abordagem inovadora para avaliação integrada dos impactos combinados da RUV, do estresse térmico e dos poluentes atmosféricos sobre a pele humana. O SEES possibilita a quantificação da exposição ambiental cutânea em diferentes escalas espaciais e temporais.

Este trabalho está estruturado em duas partes. A primeira contempla o desenvolvimento metodológico do SEES, incluindo a fundamentação teórica, a construção das matrizes de comparação *fuzzy*, o cálculo dos pesos relativos e a aplicação do escore em condições climáticas atuais. A segunda parte da tese apresenta a aplicação do SEES em projeções climáticas futuras, considerando diferentes períodos e contextos regionais. As análises incluem comparações entre horizontes temporais, avaliação de diferenças percentuais e aplicação de testes estatísticos não paramétricos, como o teste de Mann–Whitney, para verificação da significância estatística das mudanças observadas.

A inclusão de projeções climáticas justifica-se pelo fato de que o aumento da temperatura média global, as alterações nos regimes atmosféricos e as mudanças na composição química da atmosfera podem intensificar a frequência e a magnitude de eventos extremos, aumentar concentrações de poluentes atmosféricos e modificar padrões de RUV ao longo do século XXI (IPCC, 2022; Yamamoto et al., 2024). Essas alterações possuem potencial para ampliar os riscos ambientais associados à saúde da pele, especialmente em regiões tropicais e subtropicais.

Diante das consequências da exposição ambiental cotidiana e da lacuna existente na literatura quanto à integração dos principais estressores ambientais associados à saúde da pele,

o objetivo geral desta tese foi desenvolver uma métrica capaz de representar o efeito combinado desses fatores ambientais sobre a pele humana. Especificamente, buscou-se: a) estruturar e fundamentar teoricamente um modelo multicritério para integrar os principais estressores ambientais associados ao dano cutâneo (RUV, estresse térmico e poluentes atmosféricos), definindo coeficientes de risco e hierarquia de importância via Fuzzy AHP; b) formular matematicamente o *Skin Environmental Exposure Score* (SEES) e validar sua sensibilidade a cenários de exposição combinada, estabelecendo limiares e categorias de risco com base em análises de consistência e sensibilidade; c) aplicar o SEES em escala global para identificar padrões espaço-temporais atuais dos riscos ambientais à saúde da pele, avaliando a influência relativa de cada fator e comparando com índices tradicionais de estressor único; d) projetar cenários futuros de risco ambiental à saúde da pele sob mudanças climáticas (CMIP6, SSP5-8.5) para horizontes de médio e longo prazo, identificando *hotspots* de intensificação e discutindo implicações para estratégias de adaptação e políticas públicas, com ênfase na transição do conceito de fotoproteção para exoproteção.

CAPÍTULO I

UM ESCORE GLOBAL PARA EXPOSIÇÃO AMBIENTAL DA PELE: INTEGRANDO RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA, CALOR E POLUIÇÃO VIA *Fuzzy Analytical Hierarchy Process*

(CORRÊA, M.P.; BASTOS, I.R.P, YAMAMOTO, A.L.C. A global score for skin environmental exposure: integrating UV radiation, heat, and pollution via fuzzy analytic hierarchy process. **International Journal of Biometeorology**, v. 70, n. 117, 2026. DOI: https://doi.org/10.1007/s00484-026-03145-0)

Estressores ambientais como a RUV, a poluição atmosférica e as condições térmicas podem comprometer significativamente a integridade cutânea. Embora esses fatores atuem de maneira simultânea, ainda são avaliados de forma isolada, por meio de índices específicos. Nesse contexto, considerando a abordagem integrativa do expossoma extrínseco da pele, este capítulo apresenta o desenvolvimento metodológico do *Skin Environmental Exposure Score* (SEES), uma métrica inovadora capaz de quantificar os riscos ambientais sinérgicos à saúde da pele. De maneira detalhada, o capítulo apresenta a definição das variáveis ambientais utilizadas, a atribuição dos coeficientes de risco, a aplicação do método *Fuzzy Analytical Hierarchy Process* (F-AHP) para ponderação dos fatores ambientais e a formulação matemática do escore proposto.

1.1. INTRODUÇÃO

O impacto cumulativo das exposições ambientais diárias representa ameaças significativas à saúde cutânea e capilar, exigindo atenção urgente para mitigar seus efeitos nocivos. A RUV, os poluentes atmosféricos e as flutuações na temperatura ambiente (T) e umidade relativa (UR) atuam sinergicamente para comprometer a integridade epidérmica e a função folicular. Entre esses estressores, a RUV representa o perigo mais bem estabelecido, tendo sido classificada como um carcinógeno humano do Grupo 1 pela Agência Internacional de Pesquisa sobre o Câncer (IARC, 1992).

A exposição à RUV desencadeia efeitos adversos significativos em diversas estruturas biológicas. Suas consequências patológicas na pele incluem o fotoenvelhecimento, fotodermatoses e a degradação estrutural das fibras capilares por meio da desnaturação proteica, perda de pigmentação e aumento da fragilidade (Lee, 2009; de Vecchi et al., 2019). Além disso, a RUV representa um risco bem estabelecido de danos oculares, contribuindo para condições como catarata, pterígio e fotoceratite (Löfgreen, 2016; Neale et al., 2023).

Os impactos cutâneos de poluentes suspensos no ar são igualmente preocupantes, os quais a IARC reconheceu de forma semelhante por seu potencial mutagênico e carcinogênico (IARC, 2015). Material particulado (PM), ozônio (O_3), dióxido de enxofre (SO_2), óxidos de nitrogênio (NO_x), compostos de carbono (CO, CO_2), compostos orgânicos voláteis (COVs) e hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAHs) têm sido implicados em diversas patologias dermatológicas, incluindo envelhecimento acelerado, despigmentação, dermatite atópica e neoplasias (Puri et al., 2017; Roberts, 2021).

O O_3 ao nível do solo induz efeitos particularmente deletérios através de mecanismos de estresse oxidativo que sobrecarregam as defesas antioxidantes cutâneas, resultando em cascatas inflamatórias que se manifestam clinicamente como linhas finas de expressão e rugas, comprometimento da função de barreira e agravamento de dermatoses pré-existentes (Mancebo e Wang, 2015; Parrado et al., 2019). Este dano oxidativo é potencializado quando a exposição ao O_3 coincide com a RUV, criando um ambiente inflamatório que amplifica o dano (Ferrara et al., 2020). Poluentes adicionais, incluindo SO_2 e NO_2, contribuem de forma semelhante para a lesão oxidativa, acelerando a formação de rugas e manchas, ao mesmo tempo que comprometem a integridade da estrutura capilar (Appenzeller e Tsatsakids, 2012; Li et al., 2017; Liang et al., 2020).

Embora os efeitos prejudiciais da poluição do ar na integridade da pele estejam bem documentados, as evidências ressaltam seu impacto significativo e paralelo na saúde ocular. Estudos epidemiológicos e clínicos vinculam consistentemente a exposição a poluentes atmosféricos ambientais, particularmente $PM_{2.5}$ e PM_{10}, NO_2 e COVs, a uma maior prevalência e gravidade de diversas doenças oculares. As principais condições associadas incluem a doença do olho seco, na qual os poluentes rompem o filme lacrimal e agravam a inflamação; a conjuntivite alérgica, impulsionada pela alergenicidade e resposta imune aumentadas pelos poluentes; e distúrbios inflamatórios da superfície ocular.

Além disso, a exposição crônica a poluentes específicos tem sido associada a desfechos mais graves, como glaucoma e degeneração macular relacionada à idade, sugerindo vias de dano sistêmicas e neurovasculares. Portanto, a morbidade ocular representa uma consequência crítica, embora muitas vezes subestimada, da poluição do ar para a saúde pública, necessitando de estratégias clínicas e ambientais integradas para mitigar o risco (Millen et al., 2024).

A interação entre T e UR modula ainda mais as respostas cutâneas através de efeitos na termorregulação e na homeostase da barreira da pele. Embora modelos empíricos e

computacionais tenham caracterizado essas relações (Zhao et al., 2021), as implicações clínicas são profundas. Condições de T elevada e UR reduzida favorecem o ressecamento, contrastando com a ativação sebácea e oclusão folicular promovidas por ambientes úmidos, criando caminhos divergentes para irritações na pele, aumento da acne e condições de desidratação (Xu et al., 2008). Esses fatores microclimáticos também influenciam as práticas de fotoproteção, onde o desconforto térmico causado por protetores solares oclusivos pode comprometer a termorregulação e a adesão ao uso (Garzón-Mosquera e Aragón-Vargas, 2024). O desconforto térmico também pode comprometer o crescimento do cabelo e a textura da fibra capilar (Monselise et al., 2017).

T e UR também estão criticamente relacionadas à saúde ocular, atuando como fatores ambientais fundamentais que exacerbam uma ampla gama de patologias. A T elevada funciona como um estressor inflamatório direto na superfície ocular, aumentando a suscetibilidade a infecções como conjuntivite viral e herpes ocular. Mudanças nos padrões de umidade e o aumento de chuvas torrenciais alteram a dispersão de alérgenos e criam ambientes propícios para vetores de doenças, agravando condições como conjuntivite alérgica e uveíte infecciosa. A interação do calor com poluentes atmosféricos, como o ozônio (O_3) troposférico, agrava ainda mais o risco de doença do olho seco e outros distúrbios inflamatórios (Echevarria-Lucas et al., 2021).

É importante destacar que esses três grupos de estressores não atuam de forma meramente aditiva, mas frequentemente se potencializam mutuamente por vias biológicas compartilhadas. O estresse térmico, por exemplo, aumenta o fluxo sanguíneo cutâneo e a permeabilidade da barreira epidérmica, o que facilita tanto a penetração de poluentes atmosféricos quanto a absorção de radiação ultravioleta nas camadas mais profundas da pele (Van der Leun et al., 2008), a coexposição a O_3 e RUV produz dano oxidativo desproporcionalmente maior do que a soma dos efeitos isolados (Ferrara et al., 2020).

As ferramentas atuais de avaliação de risco à saúde ambiental, incluindo o Índice Ultravioleta (UVI) (WHO, 2002), o Índice de Qualidade do Ar (AQI) (WHO, 2006) e métricas de conforto térmico como o Humidex (Masterton e Richardson, 1979), fornecem perspectivas valiosas, porém isoladas, sobre essas exposições (Zhao et al., 2021). Por outro lado, a estrutura do expossoma extrínseco, que abrange exposições a diferentes fatores ambientais externos (Wild, 2012; Cecchi et al., 2018), exige uma abordagem integrada, onde as interações sinérgicas entre RUV, poluição e microclima estão bem estabelecidas (Krutmann et al., 2017; Passeron et al., 2021). Diante dessa complexidade, estudos recentes têm buscado integrar dados para avaliar

o expossoma externo por meio da implementação de sistemas de gestão de dados ambientais. Esse esforço de integração, ilustrado por Tagliaferro et al. (2024) por meio da implementação de um sistema de gestão de dados ambientais baseado em dados abertos, demonstrou a viabilidade técnica de reunir, em uma mesma plataforma, séries temporais de múltiplas variáveis do expossoma extrínseco (qualidade do ar, radiação solar e variáveis meteorológicas), evidenciando tanto o potencial quanto os desafios de agregar diferentes bases de dados ambientais. Entretanto, iniciativas dessa natureza permanecem concentradas na etapa de integração e disponibilização dos dados, sem propor um mecanismo formal de ponderação e agregação capaz de traduzir essas múltiplas exposições em um único indicador de risco comparável entre localidades e períodos.

Reconhecendo a necessidade crítica de ferramentas integradas para avaliar os riscos ambientais combinados à saúde da pele, este estudo apresenta o *Skin Environmental Exposure Score* (SEES), uma nova métrica que utiliza a metodologia *Fuzzy Analytical Hierarchy Process* (F-AHP) (van Laarhoven e Pedrycz, 1983) para quantificar os riscos ambientais sinérgicos à saúde cutânea. Projetado para avançar na caracterização do expossoma externo, o SEES fornece uma escala padronizada e adimensional que captura a complexa interação de RUV, poluentes atmosféricos e fatores térmicos, oferecendo uma abordagem unificada para a avaliação de riscos onde os índices tradicionais são insuficientes.

Embora projetado especificamente para a saúde da pele, o SEES também pode servir como um parâmetro ambiental adequado para a prevenção de outras condições relacionadas ao expossoma extrínseco, como doenças oculares; no entanto, como as evidências sobre os efeitos da poluição e do estresse térmico no olho ainda são relativamente limitadas (Millen et al., 2024), o termo SEES foi mantido para refletir seu foco cutâneo primário.

Para maximizar a clareza e a utilidade, adotamos deliberadamente o termo "*score*" (pontuação) em vez de "índice", ressaltando seu papel como uma medida quantitativa escalonada, em vez de um composto de unidades arbitrárias. Derivado de um modelo multicritério robusto que integra variáveis climáticas, de poluição e de RUV, o SEES é convertido em uma escala intuitiva de 0 a 1000. Essa transformação facilita comparações temporais e entre diferentes localidades, além de melhorar a comunicação com o público científico e geral. O acrônimo SEES foi escolhido estrategicamente por sua semelhança fonética com o verbo "ver" em inglês (*to see*), reforçando seu propósito: "tornar visíveis" os riscos ambientais que afetam a saúde da pele. Esse duplo sentido pode ser aproveitado em ações de divulgação por meio de mensagens ressonantes, como "SEES o ambiente, proteja sua pele" ou

“SEES o que sua pele enfrenta diariamente”, unindo a precisão técnica ao engajamento público.

1.2. MATERIAL E MÉTODOS

Este estudo propõe um novo quadro metodológico para avaliar os efeitos combinados dos principais fatores de risco ambiental para a saúde da pele: RUV, estresse térmico e poluentes atmosféricos (O_3, PM e outros gases [OG], incluindo SO_2 e NO_2). A cada fator foi atribuído um coeficiente de risco (K_i) com base em escalas de risco estabelecidas, sendo então integrados por meio de uma abordagem multicritério que combina o F-AHP para a priorização ponderada e funções de agregação otimizadas por sensibilidade. A incerteza no julgamento de especialistas é abordada utilizando números fuzzy triangulares, enquanto a análise comparativa das médias aritmética e geométrica garante uma quantificação de risco robusta.

A metodologia avalia sistematicamente as interações sinérgicas entre as variáveis meteorológicas e de poluição, com validação rigorosa por meio de verificações de consistência (CR < 10%) e testes de sensibilidade a valores extremos. As subseções subsequentes detalham as formulações matemáticas, incluindo a estruturação hierárquica, a derivação de pesos fuzzy, os procedimentos de normalização e a construção final da pontuação composta (*score*). Esta abordagem avança em relação às avaliações individuais convencionais ao fornecer um modelo escalável e consciente da incerteza para o perfil de risco do expossoma externo específico de cada região.

Todos os cálculos de F-AHP, computações do SEES, análises de sensibilidade e saídas gráficas foram realizados utilizando bibliotecas Python de código aberto (*open-source*), incluindo NumPy, Pandas, scikit-learn e Seaborn, garantindo a total reprodutibilidade do fluxo de trabalho analítico.

1.2.1. O Processo de Hierarquia Analítica Fuzzy (F-AHP) para determinar o peso de cada fator

O F-AHP é um método avançado de tomada de decisão que integra a teoria dos conjuntos fuzzy ao *Analytic Hierarchy Process* (AHP; Saaty, 1987) para lidar com a incerteza e a imprecisão em julgamentos subjetivos. O AHP é uma técnica de tomada de decisão multicritério que avalia como uma variável de resposta (em nosso estudo, o risco de exposição ambiental) se relaciona com um conjunto de preditores ambientais. No entanto, as comparações pareadas subjetivas estão sujeitas a incertezas, necessitando do uso de técnicas baseadas em lógica fuzzy (Buckley et al., 1985; Chang, 1996).

O método F-AHP é uma ferramenta eficaz para avaliar a influência de múltiplos fatores em um determinado fenômeno, contabilizando a complexidade dos atributos envolvidos (Liu et al., 2020). Esta abordagem permite a determinação da importância relativa de cada critério (RUV, poluentes e estresse térmico) por meio de comparações pareadas em uma análise não paramétrica.

A robustez do F-AHP é demonstrada ainda por sua ampla aplicação na tomada de decisão multicritério para estudos de saúde pública (Chao et al., 2008; Kim e Jung, 2023). O F-AHP tem sido empregado em diversas aplicações, incluindo o desenvolvimento de índices de saúde de qualidade do ar (Gorai et al., 2015), avaliação de riscos e impactos ambientais e de saúde (Zheng et al., 2012; Akash et al., 2024; Nguyen et al., 2025), planejamento de gestão hídrica (Srdjevic e Medeiros, 2008), preparação para desastres em laboratórios clínicos (Ortiz-Barrios et al., 2025) e identificação de locais adequados para infraestrutura urbana (Caprioli e Bottero, 2021).

O método F-AHP garante a confiabilidade do SEES ao determinar a importância relativa de cada critério por meio de comparações pareadas, referidas como Níveis Hierárquicos Pareados (ϕ), com base em sua significância relativa. Com sua natureza adaptativa, o método utiliza a consistência da comparação para garantir a confiabilidade do processo, ajustando os valores quando necessário.

O F-AHP consiste em quatro etapas principais: (i) representação da importância relativa por meio de comparação pareada, (ii) agregação de conjuntos fuzzy para decisões em grupo e determinação de pesos/prioridades, (iii) defuzzificação dos conjuntos fuzzy em valores nítidos (*crisp values*) para a comparação final e (iv) medição da consistência dos julgamentos (Liu et al., 2020). Esta abordagem estruturada permite uma priorização clara entre diferentes fatores e garante a consistência da avaliação, resultando em um índice robusto e confiável.

A fase de decomposição envolve a construção de uma hierarquia com o objetivo do problema no nível superior e os critérios organizados em ordem decrescente. Subsequentemente, as prioridades devem ser estabelecidas para os elementos em relação aos outros dentro do sistema de decisão hierárquico. Uma matriz de comparação pareada é então construída para determinar os níveis hierárquicos comparativos utilizando tanto a escala de Saaty (Figura 1.1) quanto os números fuzzy (Tabela 1.1). A relação de dominância entre os valores de ϕ varia de 1 a 9, onde:

- Nível 1 indica uma contribuição igual de ambos os atributos em relação ao objetivo.

- Níveis 3 e 5 representam, respectivamente, uma preferência leve ou forte de um atributo em relação ao outro.
- Nível 7 demonstra a dominância prática (importância muito forte) de um atributo sobre o outro.
- O nível máximo (9) indica evidência absoluta favorecendo um atributo em relação ao outro.
- Valores intermediários (φ = 2, 4, 6 e 8) são utilizados quando é necessário representar níveis de preferência intermediários entre os níveis principais.



Figura 1. 1 - Níveis hierárquicos de comparação par a par (φ) para matrizes de comparação no AHP.

Tabela 1.1 - Comparações par a par de Saaty e escalas triangulares fuzzy (Li et al., 2009).

Escala de Saaty	Escala triangular Fuzzy
1	(1,1,1)
2	(1,2,3)
3	(2,3,4)
4	(3,4,5)
5	(4,5,6)
6	(5,6,7)
7	(6,7,8)
8	(7,8,9)
9	(9,9,9)

Primeiro, a matriz fuzzy de comparação par a par (Φ) é construída como mostrada na Equação (1.1). Os pesos relativos desses níveis hierárquicos são calculados por meio da determinação de pesos fuzzy e da defuzzificação, realizada pelo cálculo do centróide da área, a fim de obter os valores absolutos dos pesos ($\vec{v}$). Na matriz de comparação (Φ), cada fator é comparado par a par com os outros, atribuindo valores de acordo com o nível φ e expressado como número triangular fuzzy, de acordo com $\varphi_{ij} = (l_{ij},\ m_{ij}, u_{ij})$, usando os valores numéricos e relações apresentados na Tabela 1.1. Para evitar confusão com a notação convencional dos elementos da matriz (onde *i* e *j* representam índices de linha e coluna,

respectivamente), cada fator na matriz Φ é definido utilizando números romanos.

$$\Phi = \begin{pmatrix} (1,1,1) & (l_{I,II}, m_{I,II}, u_{I,II}) & (l_{I,III}, m_{I,III}, u_{I,III}) & \cdots & (l_{I,n}, m_{I,n}, u_{I,n}) \\ (1/u_{I,II}, 1/m_{I,II}, 1/l_{I,II}) & (1,1,1) & (l_{II,III}, m_{II,III}, u_{II,III}) & \ldots & (l_{II,n}, m_{II,n}, u_{II,n}) \\ (1/u_{I,III}, 1/m_{I,III}, 1/l_{I,III}) & (1/u_{I,III}, 1/m_{I,III}, 1/l_{I,III}) & (1,1,1) & \ldots & (l_{III,n}, m_{III,n}, u_{III,n}) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \\ (1/u_{I,n}, 1/m_{I,n}, 1/l) & (1/u_{n,II}, 1/m_{n,II}, 1/l_{n,II}) & (1/u_{n,III}, 1/m_{n,III}, 1/l_{n,III}) & & (1,1,1) \end{pmatrix} \quad (1.1)$$

Seguindo a metodologia de Buckley (1985), primeiro calculamos a média geométrica ($\tilde{r}_i$) usando a Equação (1.2) e depois os pesos são calculados por meio da Equação (1.3). Considere o número fuzzy triangular $\varphi_{I,n} = (l_{I,n}, m_{I,n}, u_{I,n})$ nas seguintes operações:

$$\tilde{r}_i = (\tilde{\varphi}_{i1} \text{ x } \ldots \text{ x } \tilde{\varphi}_{ij} \text{ x } \ldots \text{ x } \tilde{\varphi}_{in})^{1/n} \quad (1.2)$$

$$\tilde{w}_i = \tilde{r}_i \times (\tilde{r}_1 + \cdots + \tilde{r}_i + \cdots + \tilde{r}_n)^{-1} \quad (1.3)$$

Em que $\tilde{\varphi}_{ij}$ representa o valor agregado de comparação do critério *i* em relação ao critério *j*, $\tilde{r}_i$ é a média geométrica das comparações fuzzy entre o critério *i* e todos demais critérios; e $\tilde{w}_i$ denota o peso fuzzy do i-ésimo critério, expresso como um número fuzzy triangular, $\tilde{w}_i = (lw_i, mw_i, uw_i)$, em que lw_i, mw_i, uw_i correspondem, respectivamente, aos valores inferior, médio e superior do peso fuzzy.

Então, os pesos fuzzy são convertidos em valores determinísticos utilizando o método do centróide de Buckley (1985) para números fuzzy triangulares:

$$C(\tilde{w}_i) = \frac{lw_i + mw_i + uw_i}{3} \quad (1.4)$$

Em sequência, os pesos foram normalizados usando:

$$v_i = \frac{C(\tilde{w}_i)}{\sum_{i=1}^{n} C(\tilde{w}_i)} \quad (1.5)$$

O vetor de prioridade (autovetor $\vec{v}$), composto pelos elementos v_i, quantifica a contribuição relativa de cada fator. Observa-se que a soma de todos os valores v_i é sempre igual a 1.

$$\vec{v} = \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ \vdots \\ v_n \end{pmatrix} \quad (1.6)$$

A validação da consistência é fundamental e depende das atribuições de pesos realizadas pelo pesquisador (Saaty & Vargas, 2013). Essa consistência é avaliada por meio das Equações:

$$\mathrm{CI} = \frac{(\lambda_{\max} - \mathrm{n})}{(\mathrm{n} - 1)} \quad (1.7)$$

$$\mathrm{CR} = \frac{\mathrm{CI}}{\mathrm{RI}_d} \quad (1.8)$$

Em que n é a ordem da matriz e λ_{max} é o autovalor principal da matriz de comparação Φ, calculado através da Equação (1.9):

$$\lambda_{max} = \sum_{j=1}^{n} \frac{\Phi\widetilde{V}_i}{n\widetilde{V}_i} \quad (1.9)$$

O índice randômico de consistência (RI_d), proposto por Saaty (2005), varia de acordo com o número de indicadores. O Índice de Consistência (CI) abaixo de 10% confirma que os coeficientes no vetor são estatisticamente válidos no vetor $\vec{v}$, para construção do índice (Saaty, 1987; Saaty, 2006).

1.2.2. Seleção da função de agregação

Neste estudo, avaliamos duas funções de agregação padrão para subíndices em avaliação de risco multicritério (Nguyen et al., 2022): as médias aritmética ponderada e geométrica ponderada, conforme mostrado nas Equações (1.10) e (1.11). Calculamos a sensibilidade de ambos os métodos de agregação e selecionamos aquele com maior capacidade de resposta.

Média aritmética ponderada: $\mathrm{SEES} = \sum_1^{\mathrm{n}} \mathrm{v_i K_i}$ (1.10)

Média geométrica ponderada: $\mathrm{SEES} = \prod_1^{\mathrm{n}} \mathrm{K_i}^{\mathrm{v_i}}$ (1.11)

Em que v_i é o peso de cada fator i; K_i é o sub-índice de cada fator i, e o SEES é o índice proposto neste trabalho: *Skin Environmental Exposure Score* (SEES).

Para comparar a capacidade de resposta das médias ponderadas aritmética e geométrica utilizadas na agregação dos subíndices, foi realizada uma análise de sensibilidade estruturada, focando nos dois fatores mais influentes identificados pelo F-AHP: o parâmetro de maior peso (UVI) e o parâmetro de menor peso (OG). Nesta análise, os coeficientes K_{UVI} e K_{OG} foram testados em etapas de uma unidade ao longo de valores possíveis, enquanto todos os outros fatores e seus pesos foram mantidos constantes.

A média geométrica ponderada exibiu uma discriminação de risco mais forte, amplificando o impacto de variações extremas no UVI e penalizando de forma mais clara combinações nas quais qualquer subíndice individual assumisse um valor de alto risco. Em contraste, a média aritmética ponderada tendeu a suavizar esses extremos e produziu mudanças menos pronunciadas no SEES global. Este comportamento é desejável para um indicador de risco preventivo, pois garante que excursões críticas em um único fator ambiental não sejam mascaradas por condições mais moderadas nas demais dimensões, resultando, assim, em uma pontuação composta mais responsiva e precavida.

Do ponto de vista teórico, tanto a agregação aritmética quanto a geométrica são amplamente utilizadas em índices multicritério ambientais e de risco à saúde, incluindo pontuações de qualidade do ar e de exposição composta à saúde. A média aritmética preserva a compensação linear entre os critérios, permitindo que valores altos em uma dimensão compensem valores baixos em outra.

Em contraste, a média geométrica é mais conservadora por construção, reduzindo a compensação total e aumentando a influência do subíndice com pior desempenho. Em aplicações nas quais se espera que exposições extremas em qualquer fator individual (por exemplo, RUV ou material particulado fino) desempenhem um papel crítico nos desfechos de saúde, a literatura frequentemente recomenda a agregação geométrica como uma forma de evitar o mascaramento de condições de alto risco, o que se alinha aos objetivos do SEES e aos resultados de nossa análise de sensibilidade.

Para facilitar a interpretação por leitores de diferentes disciplinas, os principais termos utilizados na construção do SEES estão resumidos na Tabela 1.2:

Tabela 1.2 - Terminologias Chave

Termo	Definições

Fator	Um determinante ambiental amplo que afeta a saúde da pele. Critério conceitual ou categoria que agrupa um ou mais parâmetros relacionados (ex: radiação ultravioleta, estresse térmico, poluentes atmosféricos) utilizados na estrutura hierárquica do F-AHP.
Parâmetro	Variável ambiental mensurável que entra no modelo antes da normalização (ex: UVI, concentração de poluentes, índice térmico) e a partir da qual um subíndice é computado.
Sub-índice (K_i)	Pontuação adimensional que representa o nível de risco associado a um único fator ambiental (geralmente variando de 0 a 1 ou 0 a 10), derivado do valor medido ou estimado de um parâmetro específico (ex: RUV, O_3, PM, OG), obtido após a normalização da variável bruta correspondente. Ele quantifica o nível de risco relativo associado a esse fator individual.
Peso (ν_i)	Um coeficiente derivado por meio do processo Fuzzy AHP, que representa a importância relativa de um fator (e seu subíndice associado) ao contribuir para o índice composto global.
SEES	O índice composto final, calculado pela agregação de todos os subíndices ponderados (Ki) utilizando a função selecionada.

1.2.3. Desenvolvimento do Índice de Risco

1.2.3.1. Fatores de risco relacionados ao expossoma extrínseco da pele

Os coeficientes de risco K_i definidos neste estudo baseiam-se em índices ambientais amplamente estabelecidos, os quais são detalhados nesta seção. Esses índices constituem a base quantitativa do modelo proposto, uma vez que representam os principais instrumentos utilizados para a comunicação pública de condições relacionadas à exposição solar, ao desconforto térmico e à qualidade do ar.

O risco à saúde associado à RUV é quantificado por meio do UVI. Definido pela Organização Mundial da Saúde (OMS), o UVI vai além de um conceito teórico, funcionando como uma medida padronizada e adimensional com aplicações práticas na avaliação do risco de RUV induzindo eritema em locais e horários específicos (WHO, 2002).

A escala do UVI correlaciona-se diretamente com a irradiância eritêmica, na qual uma unidade de UVI corresponde a 25 mWm^{-2} de irradiância eritêmica (Equações 1.12 e 1.13). A irradiância eritêmica é calculada como a irradiância solar ultravioleta espectralmente ponderada (entre 280 e 400 nm) utilizando o espectro de ação de eritema da Comissão Internacional de Iluminação (CIE) para pele humana (McKinlay e Diffey, 1987). Valores mais elevados de UVI

indicam maior potencial de danos à pele, cabelo e olhos, com tempos de exposição mais curtos necessários para provocar efeitos adversos.

$$\mathrm{UVI} = 40 \times \mathrm{S} \qquad (1.12)$$

$$\text{em que} \quad \mathrm{S} = \int_{280\,\mathrm{nm}}^{400\,\mathrm{nm}} \varepsilon_\lambda \mathrm{I}_\lambda \mathrm{d}\lambda \quad (1.13)$$

A classificação do UVI reconhecida internacionalmente e suas respectivas categorias de risco à saúde são apresentadas na Tabela 1.3.

Tabela 1.3 - Escala do Índice Ultravioleta e categorias de exposição (WHO, 2002).

UVI	**Categoria de exposição**
0 – 2	Baixo
3 – 5	Moderado
6 – 7	Alto
8 – 10	Muito alto
≥ 11	Extremo

O índice Humidex (H) foi selecionado para avaliar os riscos de estresse térmico (Masterton e Richardson, 1979). Esse índice quantifica a sensação térmica percebida a partir da combinação da T e UR, conforme apresentado na Equação 1.14:

$$\mathrm{H} = \mathrm{T} + \left(\frac{5}{9}\right)[\mathrm{e_a} - 10] \qquad (1.14)$$

Em que $\mathrm{e_a}$ é a pressão de vapor d'água (hPa), que pode ser calculada a partir da Equação 1.15 (ABOM, 2010):

$$\mathrm{e_a} = 6{,}105 \text{ x } \mathrm{e}^{(17{,}27.\mathrm{T})/(237{,}7+\mathrm{T})} \mathrm{x} \frac{\mathrm{UR}}{100} \qquad (1.15)$$

Assim, o H pode ser computado conforme a Equação 1.16:

$$\mathrm{H} = \mathrm{T} + \left(\frac{5}{9}\right)\left[\left(6{,}105 \text{ x } \mathrm{e}^{(17{,}27.\mathrm{T})/(237{,}7+\mathrm{T})} \mathrm{x} \frac{\mathrm{UR}}{100}\right) - 10\right] \qquad (1.16)$$

Uma pressão de vapor real mais alta (devido à alta temperatura e/ou alta umidade relativa) leva a um valor Humidex mais alto, indicando condições mais quentes e opressivas, com sensação térmica superior à temperatura real do ar. A Tabela 1.4 resume os coeficientes de risco associados a cada categoria H (ECCC, 2016):

Tabela 1.4 - Escala de faixa Humidex (ECCC, 2016).

Faixa de Humidex (H)	Escala de desconforto
0 – 19	Nenhum
20 – 29	Pequeno desconforto
30 – 39	Algum desconforto
40 – 45	Grande desconforto
> 45	Perigoso

A qualidade do ar foi avaliada por meio do Índice de Qualidade do Ar (AQI), que agrega as concentrações de poluentes na superfície, incluindo O_3, PM, CO_2, SO_2 e NO_2. O AQI é uma escala numérica padronizada utilizada para comunicar ao público o quão poluído o ar está no momento ou a previsão de quão poluído ele se tornará. De acordo com a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA, 2018), o AQI é calculado através da Equação 1.17:

$$\mathrm{AQI}_i = \frac{\mathrm{I_{Hi}} - \mathrm{I_{Lo}}}{\mathrm{C_{Hi}} - \mathrm{C_{Lo}}} * (\mathrm{C_i} - \mathrm{C_{Lo}}) + \mathrm{I_{Lo}} \qquad (1.17)$$

Em que i representa um poluente específico; C_i é a concentração monitorada do poluente; C_{Hi} e C_{Lo} são as concentrações dos pontos de corte das classes superior e inferior para C_i, respectivamente; e I_{Hi} e I_{Lo} são os pontos de corte do índice correspondentes a C_{Hi} e C_{Lo}, respectivamente.

A pontuação para cada poluente é não linear, e o AQI_i pode ser calculado separadamente para cada componente (i). Ele traduz dados complexos de qualidade do ar em um único número e cor de fácil compreensão, que indica o nível de risco à saúde associado à respiração do ar. Valores mais altos de AQI correspondem a uma pior qualidade do ar. A Tabela 1.5 mostra os coeficientes de risco dos poluentes do AQI e os parâmetros associados.

Tabela 1.5 - Limites do Índice de Qualidade do Ar (AQI) (EPA, 2018).

	Níveis de preocupação com a saúde	**SO_2 (1-hora, ppb)**	**$PM_{2,5}$ (24-horas, µg/m³)**	**NO_2 (1-hora, ppb)**	**O_3 (8-horas, ppm)**

Valores de I_{Lo} e I_{Hi}		C_{Lo}	C_{Hi}	C_{Lo}	C_{Hi}	C_{Lo}	C_{Hi}	C_{Lo}	C_{Hi}
0-50	Bom	0	35	0	12	0	53	0	0,054
51-100	Moderado	36	75	12,1	35,4	54	100	0,055	0,070
101-150	Prejudicial*	76	185	35,5	55,4	101	360	0,071	0,085
151-200	Prejudicial	186	304	55,5	150,4	361	649	0,086	0,105
201-300	Muito prejudicial	-	-	150,5	250,4	650	1.249	0,106	0,200
301-400	Perigoso	-	-	250,5	500,4	1.250	2.049	-	-

*Prejudicial a grupos sensíveis.

Os coeficientes de risco K_i atribuídos, baseados nas faixas categorizadas dos índices ambientais (UVI, H e AQIi), são apresentados na Tabela 1.6.

Tabela 1.6 - Limiares de UVI, H e AQIi e o índice Ki correspondente.

UVI	Humidex range (H)	AQI_i Limites	K_i
0 – 2	0 – 19	0 – 50	1
3 – 5	20 – 29	51 – 100	2
6 – 7	30 – 39	101 – 150	3
8 – 10	40 – 45	151 – 200	4
> 11	> 45	201 – 250	5
		251 – 300	6

1.2.3.2. Níveis hierárquicos de comparação pareada (φ), atribuição de pesos e aplicação do AHP

A matriz ϕ (Equação 1.1) para o *score* proposto é construída realizando comparações pareadas entre cinco variáveis-chave: UVI, H, O_3, PM2.5, e uma categoria combinada para outros gases (OG), onde OG representa o AQI associado aos gases SO_2 ou NO_2. Cada elemento ϕij da matriz ΦSEES corresponde ao valor comparativo entre pares de variáveis, com linhas (i) e colunas (j) seguindo a ordem das variáveis: (1) UVI, (2) H, (3) O_3, (4) PM2.5, e (5) OG.

$$\Phi_{SEES} = \begin{pmatrix} (1,1,1) & (5,6,7) & (5,6,7) & (5,6,7) & (9,9,9) \\ (1/7, 1/6, 1/5) & (1,1,1) & (1,1,1) & (1,2,3) & (5,6,7) \\ (1/7, 1/6, 1/5) & (1,1,1) & (1,1,1) & (1,2,3) & (5,6,7) \\ (1/7, 1/6, 1/5) & (1/3, 1/2, 1/1) & (1/3, 1/2, 1/1) & (1,1,1) & (2,3,4) \\ (1/9, 1/9, 1/9) & (1/4, 1/3, 1/2) & (1/7, 1/6, 1/5) & (1/4, 1/3, 1/2) & (1,1,1) \end{pmatrix} \quad (1.18)$$

Os pesos φ atribuídos a cada critério pareado refletem sua importância relativa, mas carregam inerentemente incerteza e subjetividade (Saaty, 2005). Para mitigar isso, adotamos uma escala baseada em danos, priorizando os riscos à saúde da pele. A RUV detém o peso mais alto devido à sua carcinogenicidade bem documentada (IARC, 1992; Zhang et al., 2019),

seguida pelo estresse térmico e pelo O_3 na superfície (Corrêa et al., 2021; Passeron et al., 2021). Esta hierarquia alinha-se com as evidências que ligam a RUV ao desenvolvimento do câncer de pele (Chang et al., 2010; Teng et al., 2021; Schalka e Corrêa, 2024), ressaltando sua prioridade em nossa avaliação.

O estresse térmico, embora secundário, potencializa significativamente os danos à pele ao ativar proteínas de choque térmico, alterar vias de sinalização e aumentar a permeabilidade cutânea e o fluxo sanguíneo — fatores que exacerbam a carcinogenicidade induzida pela RUV (Van der Leun et al., 2008). Entre os poluentes atmosféricos, o O_3 representa o maior risco, induzindo o dano oxidativo na epiderme e desencadeando respostas inflamatórias (Thiele et al., 1997), enquanto o material particulado ($PM_{2.5}$) contribui para o estresse oxidativo (Baudouin et al., 2002; Drakaki et al., 2014). Embora os efeitos do $PM_{2.5}$, sejam menos graves que os da RUV ou do O_3, sua inclusão é crítica dado seu papel como um indicador (proxy) para a poluição local por nanopartículas (partículas ultrafinas foram excluídas devido a limitações de dados).

Por fim, outros gases (OG; NO_2 e SO_2) receberam os pesos mais baixos devido aos seus impactos cutâneos comparativamente menores e maior incerteza. Iterações futuras poderiam incorporar compostos orgânicos voláteis (COVs), hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAHs) e partículas ultrafinas, caso os dados se tornem disponíveis. Este sistema de ponderação em níveis (*tiered weighting system*) equilibra os riscos conhecidos com as restrições práticas, oferecendo uma estrutura escalável para avaliações de saúde ambiental da pele.

1.2.4. *The Skin Environmental Exposure Score (SEES)*

O SEES integra os efeitos cumulativos das exposições ambientais por meio de uma função de agregação projetada para manter a sensibilidade em toda a faixa dinâmica de cada fator (Khouri & Al-Moufti, 2022). Análises de sensibilidade revelam que a média geométrica ponderada (sensibilidade de 20,7%) supera a média aritmética (10,2%), pois tanto preserva a ponderação hierárquica predefinida dos fatores quanto captura de forma mais eficaz suas interações multiplicativas e sinérgicas. Os resultados detalhados dessas avaliações de sensibilidade são apresentados na Tabela 1.7.

Tabela 1.7 - Resultados da avaliação de sensibilidade das duas funções de agregação.

Fatores	K_i	Média aritmética ponderada		Média geométrica ponderada	
		SEES	Sensibilidade	SEES	Sensibilidade
UVI	1	457	-	250	-
	2	593	29.7	491	95.9

	3	728	22.9	683	39.2
	4	864	18.6	850	24.4
	5	1000	15.7	1000	17.6
Outros gases	1	953	-	915	-
	2	963	1.0	947	3.5
	3	972	1.0	966	2.0
	4	981	1.0	980	1.4
	5	991	1.0	991	1.1
	6	1000	0.9	1000	0.9
Sensibilidade média			10.2 %		20.7 %

Diferente da média aritmética, que dilui as variações de forma uniforme e atenua desproporcionalmente a influência de fatores de alta prioridade como a RUV (o principal impulsionador do dano extrínseco da pele), as propriedades não lineares da média geométrica garantem que os riscos críticos mantenham seu impacto proporcional no *score* agregado. Esta abordagem alinha-se à realidade biológica de estressores ambientais compostos, respeitando a hierarquia de risco fundamental do SEES.

O SEES é formulado como uma combinação geométrica ponderada de coeficientes de risco de exposição (K_i), onde a ponderação hierárquica é determinada pelo autovetor $\vec{v}$, fornecido pela Equação (1.6): $\vec{v} = \begin{pmatrix} 0.58 \\ 0.15 \\ 0.15 \\ 0.08 \\ 0.04 \end{pmatrix}$. Isso resulta em:

$$\text{SEES} = C \prod v_i{}^{K_i} = C(0.58^{K_{UV}} * 0.15^{K_H} * 0.15^{K_{O3}} * 0.08^{K_{PM}} * 0.04^{K_{OG}}) \qquad (1.19)$$

Onde C é um fator de normalização que ajusta o *score* para uma faixa de 0 a 1000 (Han et al., 2011):

$$\text{C} = \frac{\text{SEES} - \text{SEES}_{\text{min}}}{\text{SEES}_{\text{max}} - \text{SEES}_{\text{min}}} * 1000 \qquad (1.20)$$

SEES_{min} = 1,00 e SEES_{max} = 5,25 representam as condições teóricas de risco mínimo e máximo, correspondendo a todos os valores de K_i em seus limites inferior e superior, respectivamente.

A consistência estatística do esquema de ponderação foi verificada por meio da Razão

de Consistência (CR). Além de seu valor numérico, a CR tem implicações práticas diretas para a interpretação da confiabilidade do conjunto de pesos. Neste estudo, o autovalor máximo λ_{max} = 5,22 resulta em um CI de 5,5% e uma CR de 4,9%, o que está bem abaixo do limiar convencional de CR < 10%.

Isso indica que os julgamentos pareados baseados em danos, utilizados para priorizar UVI, H, O_3, $PM_{2.5}$, e OG, são internamente coerentes: se um fator é julgado mais influente que outro, essas preferências não são contraditas sistematicamente em outra parte da matriz de comparação. Para leitores menos familiarizados com o F-AHP, uma CR baixa significa que o autovetor resultante $\vec{v}$ (Equação 1.6) pode ser interpretado como uma representação estável e logicamente consistente das contribuições de risco relativo. Em contraste, uma CR que excedesse o limiar de 10% sinalizaria que os julgamentos dos especialistas deveriam ser revisados antes de utilizar os pesos na construção do índice.

Apesar da robustez matemática da formulação do SEES e do desempenho satisfatório da estrutura F-AHP, os pesos e coeficientes de risco resultantes são inerentemente dependentes do contexto. Em contraste com indicadores padronizados como o UVI e o AQI, que não são recalibrados regionalmente, mas fornecem uma descrição normalizada de uma condição ambiental específica em um determinado local e tempo, o SEES é projetado como uma pontuação de risco composta que integra múltiplas exposições em uma única escala.

Como consequência, a hierarquia atual, na qual a RUV domina, seguida pelo estresse térmico, O_3, PM e OG, captura uma priorização baseada em danos amplamente aplicável que deve permanecer válida em muitos ambientes urbanos de latitudes médias e sob uma ampla gama de condições típicas. A recalibração regional dos pesos, portanto, não é estritamente necessária para a maioria das aplicações práticas, desde que os perfis de exposição locais estejam dentro do domínio de variabilidade para o qual a hierarquia atual foi concebida.

No entanto, em cenários com regimes de RUV diferentes, misturas de poluentes ou perfis térmicos distintos (por exemplo, regiões de alta altitude, áreas fortemente industrializadas ou climas com calor e umidade extremos), ou quando novas evidências epidemiológicas indicarem impactos relativos substancialmente diferentes de cada fator, um procedimento de recalibração direcionado, idealmente envolvendo especialistas locais e dados de exposição ou saúde atualizados, pode ser justificado para garantir que o SEES mantenha sua relevância e precisão. A revisão periódica dos julgamentos pareados e das prioridades resultantes, particularmente sob rápidas mudanças climáticas ou urbanas, é recomendada como uma boa

prática, e não como um requisito estrito para o uso rotineiro do SEES.

1.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

1.3.1. Teste de sensibilidade e escala do SEES

O SEES classifica os riscos de exposição ambiental em oito níveis distintos de impacto à saúde: nenhum, baixo, moderado, preocupante, alto, muito alto, extremo e severo. Esse sistema de classificação foi desenvolvido por meio de um rigoroso processo em três etapas.

Primeiro, realizamos análises de sensibilidade abrangentes em todas as combinações possíveis de cenários de exposição utilizando os coeficientes de risco K_i. A escala de UVI foi adotada como a estrutura de referência para definir as categorias de risco, refletindo tanto sua ponderação predominante (58%) no SEES quanto sua correlação bem estabelecida com danos dermatológicos. Em segundo lugar, os limiares quantitativos entre os níveis de risco foram determinados sistematicamente avaliando a variabilidade individual em cada fator ambiental (RUV, estresse térmico, ozônio, $PM_{2.5}$, e outros gases), seus efeitos sinérgicos na saúde cutânea e seu potencial de dano cumulativo em cenários de exposição combinada.

Finalmente, os limiares propostos foram validados em relação aos limiares biológicos conhecidos para danos na pele induzidos por RUV, dados epidemiológicos sobre efeitos dermatológicos de múltiplos estressores e marcos clínicos para patologias cutâneas impulsionadas pelo ambiente.

O sistema de classificação resultante (apresentado na Tabela 1.8) fornece uma estrutura robusta e biologicamente fundamentada para avaliar riscos à saúde ambiental. Esta abordagem oferece melhorias significativas em relação aos métodos convencionais de avaliação de estressor único, ao ancorar as categorias do SEES aos paradigmas de risco de UV estabelecidos, enquanto contabiliza os efeitos de exposição combinada.

Tabela 1.8 - Limiares e classificação de risco com base nos valores de SEES.

Limiares do SEES	Classificação do risco	Cor (RGB código)
0 – 65	Nenhum	Verde (146, 208, 80)
66 - 139	Baixo	Amarelo Claro (251, 236, 93)
140 - 229	Moderado	Amarelo (255, 255, 0)
230 - 369	Preocupante	Laranja (255, 140, 0)
370 - 489	Alto	Vermelho Claro (255, 70, 0)
490 - 534	Muito Alto	Vermelho (255, 0, 0)

530 - 794	Extremo	Roxo (128, 0, 128)
795 – 1000	Severo	Marrom (85, 39, 7)

A Figura 1.2 mostra a distribuição dos valores do SEES a partir da análise de sensibilidade em todos os coeficientes de risco de RUV (K_{UV} = 1 – 5), com faixas codificadas por cores correspondentes às categorias de risco (Tabela 1.8). A visualização demonstra como valores equivalentes de K_{UV} podem resultar em classificações divergentes do SEES devido aos efeitos moduladores de estressores ambientais simultâneos, destacando a capacidade do índice de capturar a dinâmica de exposição multifatorial.

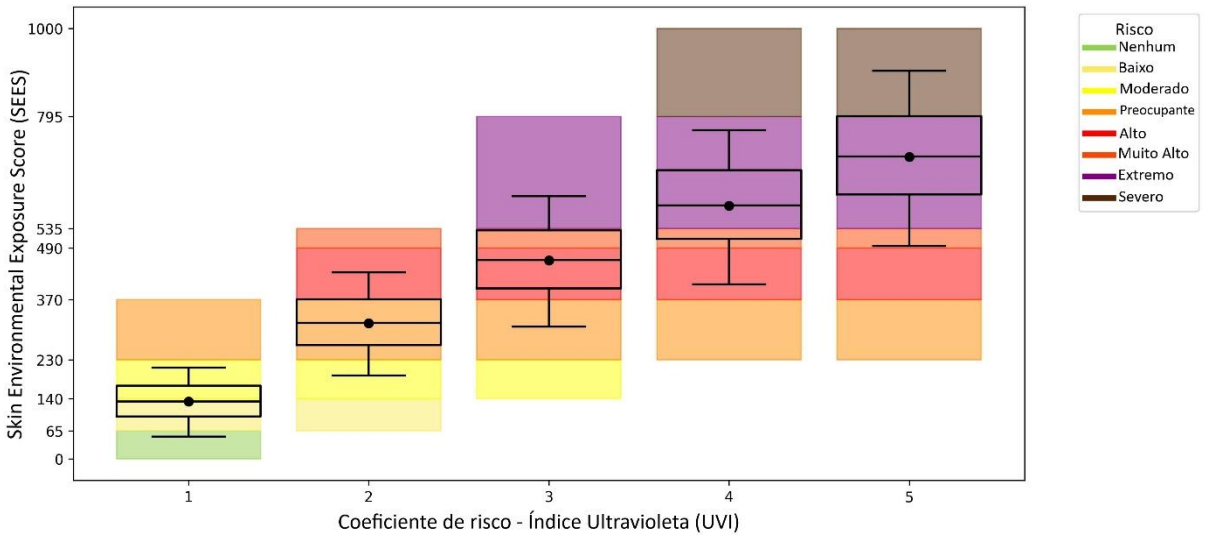


Figura 1.2 - Análise comparativa entre a variação do risco do UVI (K_{UV}) e os fatores de risco do SEES.

A categoria “nenhum risco” (K_{UV} = 1, equivalente a UVI < 2) representa o único cenário onde fotoproteção não é necessário de acordo com o guia da Organização Mundial da Saúde (WHO, 2002). Embora esta categoria possa coincidir com um desconforto térmico leve ou poluição moderada, estas condições isoladas representam riscos insignificantes para a saúde da pele na maioria das populações. No entanto, nossa análise revela que, mesmo com K_{UV} = 1, o desconforto térmico elevado ou a poluição podem elevar o risco para "Baixo", demonstrando a sensibilidade do SEES aos efeitos ambientais combinados.

O risco "Moderado" surge quando a exposição intermediária à RUV ($K_{UV} \leq 2$) coincide com desconforto térmico ou poluição substanciais (Ki ≥ 2, onde i = H ou O_3). Embora individualmente não sejam críticos, tais combinações amplificam o dano induzido por UV de forma sinérgica (Van der Leun et al., 2008; De Vecchi et al., 2019), destacando a capacidade

do SEES de detectar riscos multifatoriais que as métricas tradicionais de estressor único ignorariam.

Os níveis de risco superiores ("Preocupante" a "Extremo") refletem interseções perigosas de alta RUV ($3 \leq K_{UV} \leq 5$) com o escalonamento de estressores térmicos e de poluição. Notavelmente, cenários de $K_{UV} = 5$ atingem consistentemente os níveis "Muito Alto" ou "Extremo", preservando o papel dominante da RUV nos danos cutâneos. Projeções climáticas (Yamamoto et al., 2024) sugerem que essas combinações de alto risco se tornarão cada vez mais prevalentes, posicionando o SEES como uma ferramenta crítica para a preparação da saúde climática.

Este avanço aborda as principais limitações das escalas de UVI convencionais, que foram calibradas primariamente para contextos de zonas temperadas (Zaratti et al., 2014). Ao integrar múltiplos fatores ambientais enquanto mantém a neutralidade em relação ao tipo de pele, o SEES fornece uma estrutura globalmente mais relevante, particularmente para regiões tropicais com exposições combinadas frequentes e intensas.

1.3.2. Base de dados climáticos para aplicação do SEES

1.3.2.1. Base de dados global

Avaliamos o SEES globalmente para condições de solstício e equinócio no ano de 2022 utilizando dois conjuntos de dados de reanálise referência na literatura: o *Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2* (MERRA-2) da NASA e o *ECMWF Reanalysis version 5* (ERA5). A escolha do ano de 2022 como recorte temporal de referência para a análise global de variabilidade sazonal e horária do SEES decorreu da disponibilidade, no momento da realização desta etapa da pesquisa, de dados consolidados dos produtos MERRA-2 e ERA5 para um ano completo e climatologicamente próximo do período de desenvolvimento do índice.

O conjunto de dados MERRA-2 (Gelaro et al., 2017), com uma resolução espacial de 0.5° × 0.625°, forneceu variáveis atmosféricas cruciais, incluindo concentrações de massa superficial de SO_2 (SO2SMASS; kg m^{-3}), Carbono Negro (BCSMASS; kg m^{-3}), Carbono Orgânico (OCSMASS; kg m^{-3}), SO_4 (SO4SMASS; kg m^{-3}), Poeira - $PM_{2.5}$ (DUSMASS25; kg m^{-3}), e Sal Marinho PM 2.5 (SSSMASS25; kg m^{-3}). Adicionalmente, utilizamos a espessura óptica de aerossóis (AODANA, sem dimenções), a razão de mistura de massa de ozônio (O3; kg kg^{-1}), e o ozônio total da coluna (TO3; Dobson Units) do MERRA-2. Esses dados foram

processados através do *Tropospheric Ultraviolet and Visible* (TUV) *Radiation Model* para derivar os valores do UVI para o cálculo do SEES.

A reanálise ERA5 (Hersbach et al., 2020), de maior resolução, apresentando uma grade global de 0.25° × 0.25°, forneceu variáveis meteorológicas complementares, incluindo a temperatura do ar a 2 metros (t; K) e a umidade relativa (r; %). Ao utilizar ambos conjuntos de dados, estabelecemos os coeficientes de risco (K_i) necessários para o cálculo do SEES, combinando os dados abrangentes de poluentes do MERRA-2 e os parâmetros atmosféricos refinados do ERA5. Esta abordagem integrada permitiu uma avaliação robusta das exposições ambientais combinadas em diferentes escalas espaciais e condições temporais.

1.3.1.2. Base de dados local

Nesse estudo foram utilizados dados meteorológicos e de qualidade do ar registrados em estações meteorológicas em São Paulo e Rio de Janeiro durante os eventos de poluição do ar e estresse térmico, respectivamente. Em São Paulo, as medidas foram provenientes da estação localizada no Parque Dom Pedro II (23.5°S, 46.6°O), pertencente a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). Por sua vez, os dados do Rio de Janeiro foram obtidos na estação Adalgisa Nery (22.9°S, 43.0°O), vinculada ao Programa de Monitoramento da Qualidade do Ar da DataRio. Ambas as estações forneceram registros horários das concentrações de O_3, $PM_{2.5}$, NO_2, e SO_2, juntamente com medições de temperatura do ar e umidade relativa.

Os dados do UVI foram obtidos por meio do portal do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC/INPE), sendo derivados das medições do sensor *Ozone Monitoring Instrument* (OMI) a bordo do satélite Aura, da NASA. O sensor OMI estima a radiação ultravioleta incidente na superfície terrestre a partir de medições espectrais da luz solar espalhada pela atmosfera, possibilitando a geração de produtos com cobertura global diária e elevada resolução espacial. Essa abordagem baseada em sensoriamento remoto complementa as medições in situ de qualidade do ar, permitindo uma avaliação mais abrangente dos fatores ambientais associados à exposição da pele.

As aplicações do SEES apresentadas neste tópico baseiam-se em uma combinação de produtos de satélite, dados de reanálise (MERRA-2, ERA5) e estações meteorológicas de monitoramento em São Paulo e no Rio de Janeiro. Essa abordagem integrada, embora permita

uma avaliação abrangente das condições ambientais, apresenta limitações inerentes relacionadas à cobertura espacial dos sensores, à representatividade das medições e à resolução temporal dos dados. Redes de monitoramento em superfície com baixa densidade espacial podem não capturar adequadamente os gradientes em diferentes locais urbanos de poluição atmosférica e estresse térmico. Além disso, a resolução temporal baseada em registros horários ou diários pode não representar plenamente eventos de pico de curta duração, que podem ser particularmente relevantes para a exposição aguda da pele a estressores ambientais.

Para mitigar essas limitações, futuras implementações do SEES podem: (i) utilizar climatologias de alta resolução derivadas de registros de longo prazo de reanálises e produtos de satélite para estimar os padrões de RUV, estresse térmico e poluentes atmosféricos; (ii) incorporar modelagem numérica, como modelos de transporte de poluentes e de clima urbano, a fim de representar a variabilidade espacial em escala fina e suprir lacunas entre as estações de monitoramento; e (iii) integrar redes emergentes de sensores de baixo custo, quando disponíveis, para refinar as estimativas locais de exposição. Tais estratégias podem aumentar a robustez do SEES em regiões com infraestrutura limitada de monitoramento e contribuir para avaliações de risco com maior detalhamento espacial.

É importante destacar que o SEES, conforme aplicado neste estudo, representa condições ambientais médias em escala de área e ainda não resolve a variabilidade intraurbana ou as diferenças de vulnerabilidade em nível populacional. Fatores como nível socioeconômico, perfil ocupacional, qualidade das habitações e acesso a medidas de proteção solar (por exemplo, sombra, vestimentas adequadas, protetor solar e ambientes climatizados) podem modular significativamente o risco efetivamente experimentado por indivíduos e comunidades expostos à mesma categoria de SEES. Dessa forma, embora o SEES constitua uma ferramenta valiosa para a identificação de hotspots espaço-temporais de exposição ambiental, sua aplicação em políticas públicas deve ser complementada por informações sociais e comportamentais, de modo a orientar a priorização de intervenções voltadas às populações mais vulneráveis.

1.3.3. Aplicações

1.3.3.1. Variações sazonais e horárias globais do *Skin Environmental Exposure Score* (SEES) e interpretação dos riscos de exposição combinada

Conforme estabelecido, o SEES exibe uma pronunciada variabilidade diurna e sazonal impulsionada primariamente pela RUV, embora fatores ambientais simultâneos modifiquem

significativamente os riscos de exposição. Avaliamos esses padrões utilizando dados do MERRA-2 e ERA5 para 2022, por meio de recortes temporais (*snapshots*) representativos. Os padrões globais apresentados abaixo derivam do esquema de ponderação baseado em danos introduzido na Seção 1.2.4, onde a aplicabilidade regional e a possível re-calibração de pesos e limiares são discutidas.

Nossa análise revela padrões espaciais distintos durante solstícios e equinócios, conforme mostrado nas Figuras 1.3 (09:00 hora local) e 1.4 (meio-dia local). Regiões tropicais e subtropicais exibiram consistentemente os maiores riscos à saúde, com valores de SEES matinais frequentemente atingindo níveis de baixo a elevados durante os períodos de verão e equinócio. Notavelmente, latitudes tropicais do Sul mantiveram classificações de risco elevado na maioria das latitudes, mesmo nas primeiras horas da manhã, principalmente devido a condições persistentes de estresse térmico.

Três padrões espaciais principais surgiram desta análise global. Primeiro, valores extremos de SEES dominados pela poluição durante as manhãs de junho correlacionaram-se fortemente com emissões antropogênicas em regiões industrializadas como China, Índia e partes dos Estados Unidos, onde ondas de calor simultâneas exacerbaram ainda mais os riscos. Segundo, elevações de SEES impulsionadas pela temperatura foram particularmente evidentes em dezembro na América do Sul, sul da África e centro da Austrália, coincidindo com os máximos sazonais de temperatura. Esses padrões foram complementados por aumentos de $PM_{2.5}$ relacionados à poeira no norte da África e sul da Ásia, associados a eventos de transporte do Saara (Vasilatou et al., 2017). Terceiro, regiões de alta altitude, como os Andes, mostraram valores de SEES persistentemente elevados resultantes dos efeitos combinados de RUV intensificada, redução de vapor d'água, aumentos de ozônio dependentes da altitude e extremos sazonais de temperatura (Rivas et al., 2017; Salas et al., 2017).

Essas descobertas ressaltam como parâmetros ambientais não-UVR podem modificar criticamente os riscos de exposição de base, particularmente durante períodos de extremidade meteorológica. A metodologia integrada do SEES captura com sucesso essas interações multifatoriais que os índices tradicionais focados em RUV ignorariam, fornecendo uma avaliação mais abrangente dos riscos à saúde ambiental em diversos contextos geográficos e climáticos.

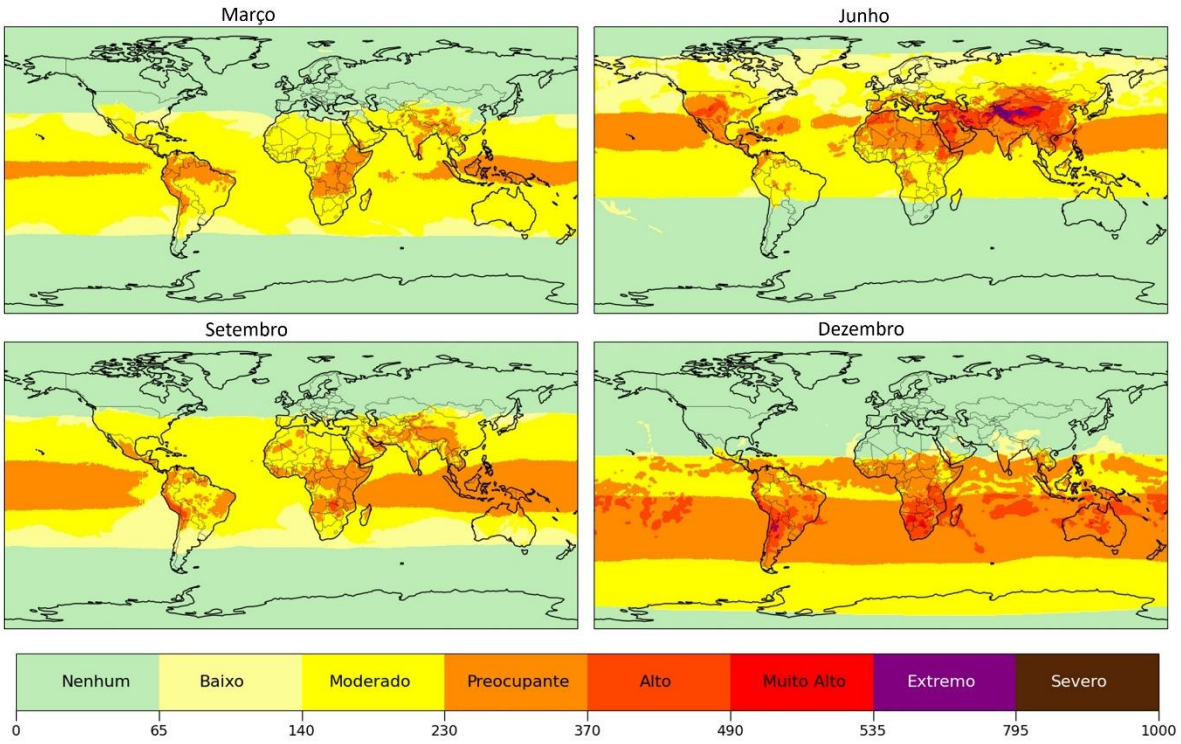


Figura 1.3 - Variação sazonal do *Skin Environmental Exposure Score* (SEES, na sigla em inglês) às 9h nos equinócios e solstícios de 2022.

A Figura 1.4 mostra os valores do SEES ao meio-dia solar local durante os solstícios e equinócios, capturando as condições de pico de radiação solar quando a RUV atinge sua intensidade diária máxima. Como esperado, as regiões tropicais e subtropicais demonstram consistentemente valores de SEES de altos a extremos, com classificações severas surgindo onde estressores ambientais adicionais potencializam a exposição à RUV. Do ponto de vista da saúde pública, esses padrões indicam que mesmo níveis moderados de SEES podem corresponder a condições que exigem o reforço das diretrizes de fotoproteção e mitigação de calor em áreas urbanas densamente povoadas.

Os equinócios revelam padrões notáveis na África Central e no Sudeste Asiático, onde a combinação de estresse térmico e poluição atmosférica eleva o SEES aos seus níveis mais altos. Nas regiões africanas, as temperaturas elevadas somadas à alta umidade durante as estações chuvosas (Yang et al., 2015; Phillipon et al., 2016) interagem com a poluição persistente por $PM_{2.5}$ proveniente de emissões urbanas, transporte de poeira e queimadas a céu aberto (Petkova et al., 2013; Fayiga et al., 2017; Jiying et al., 2023). Projeções climáticas sugerem que esses riscos se intensificarão com o aumento da frequência e duração das ondas de calor e mudanças nos padrões de precipitação em toda a África (Diedhiou et al., 2018; Fotso-Nguemo et al., 2022).

Os meses de verão mostram ampliações regionais distintas do SEES. O Oriente Médio experimenta a elevação do SEES através de temperaturas extremas, e o SEES do Sudeste Asiático é influenciado pelas interações das monções com a dispersão de aerossóis, que modificam as temperaturas de superfície e os padrões de circulação (Lau et al., 2006; Bollasina et al., 2014). As concentrações excepcionalmente altas de $PM_{2.5}$ na Ásia Ocidental ($K_{PM} > 4$) exacerbam ainda mais o SEES de junho no Sul da Ásia (Singh et al., 2019).

Um padrão particularmente evidente na Figura 1.4 refere-se aos elevados valores de SEES observados na região Centro-Oeste do Brasil durante o mês de setembro (equinócio de primavera no HS). Esse padrão coincide com o pico sazonal da estação de queimadas nessa região, quando a intensa emissão de material particulado fino e precursores de ozônio troposférico por incêndios florestais e agrícolas se soma a condições de RUV já elevadas para a latitude e à baixa umidade relativa típica do final da estação seca, produzindo uma combinação de risco multifatorial evidenciada de forma nítida mesmo antes do início do verão austral.

Ainda em relação à Figura 1.4, chama atenção a diferença de homogeneidade espacial das faixas de risco entre o solstício de junho (Hemisfério Norte) e o de dezembro (Hemisfério Sul): enquanto em dezembro as bandas de SEES seguem um padrão predominantemente latitudinal e contínuo sobre continentes e oceanos no Hemisfério Sul, em junho observa-se maior heterogeneidade entre continentes e oceanos no Hemisfério Norte. Essa assimetria decorre da distribuição desigual de massas continentais entre os hemisférios: o Hemisfério Norte concentra, nas latitudes médias e subtropicais, a maior parte das áreas industrializadas e dos grandes centros urbanos do planeta (leste da Ásia, sul da Europa, América do Norte), cujas emissões de poluentes se sobrepõem de forma heterogênea ao sinal latitudinal da RUV; já o Hemisfério Sul, nas mesmas latitudes, é dominado por superfície oceânica, sobre a qual o SEES é modulado quase exclusivamente pela RUV e pelo Humidex, sem interferência de fontes antrópicas continentais, resultando em um padrão espacial mais homogêneo e estritamente latitudinal.

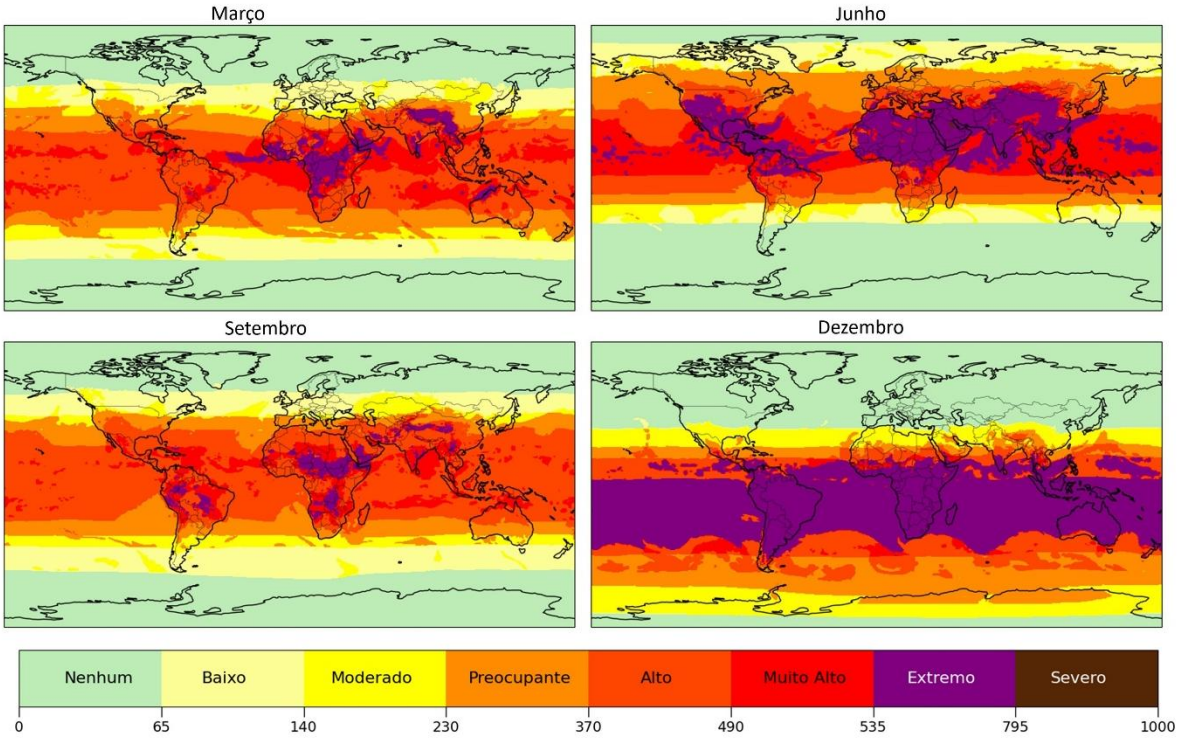


Figura 1.4 - Variação sazonal do *Skin Environmental Exposure Score* (SEES, na sigla em inglês) ao meio-dia nos equinócios e solstícios de 2022.

1.3.3.2. Avaliação e interpretação do Skin Environmental Exposure Score (SEES) durante episódios de poluição e estresse térmico

A Figura 1.5 ilustra a variação diurna do SEES em São Paulo, Brasil, em 9 de setembro nos anos de 2023 e 2024. O índice atingiu níveis significativamente mais altos em 2024 (SEES = 566, categoria extrema) em comparação com 2023 (SEES = 385, categoria alto), demonstrando o impacto substancial de condições ambientais extremas nos riscos de exposição.

De acordo com o AQIAir, o pico excepcional do SEES em 2024 coincidiu com níveis recordes de poluição do ar que classificaram temporariamente São Paulo como a cidade mais poluída do mundo, recebendo ampla cobertura mediática (CNN, 2024; G1, 2024). A CETESB relatou que agosto-setembro de 2024 registrou concentrações de poluentes sem precedentes na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), impulsionadas por múltiplos fatores, incluindo queimadas extensas e estabilidade atmosférica persistente que favoreceu o acúmulo de $PM_{2.5}$ e O_3 próximo à superfície (CETESB, 2024).

O gráfico de radar na Figura 1.5 revela distinções claras na composição do SEES entre os dois anos. Enquanto 2023 (destacado em azul) mostrou contribuições relativamente equilibradas de todos os fatores com a dominância esperada de UVI e H durante as horas de

pico solar, 2024 (em vermelho) exibiu impactos dramaticamente elevados de $PM_{2.5}$ e UVI, seguidos por H, O_3 e OG. Essa mudança reflete tanto a crise aguda de qualidade do ar quanto a crescente influência da poluição nos riscos à saúde cutânea.

Notavelmente, embora o SEES tipicamente atinja o pico ao meio-dia devido à irradiância solar máxima, esses resultados demonstram como eventos meteorológicos extremos (ondas de calor, inversões térmicas) e o acúmulo de poluentes podem modificar substancialmente tanto a magnitude quanto o perfil temporal dos riscos de exposição. O episódio de 2024 serve tanto como um alerta específico de saúde pública quanto como um indicador preocupante da deterioração das condições ambientais urbanas, com implicações significativas para a saúde da pele em megacidades que enfrentam extremos climáticos crescentes. Esta descoberta reforça a interpretação de que os altos valores de SEES em regiões tropicais e subtropicais não são apenas uma consequência da intensidade da RUV, mas emergem dos efeitos combinados do calor e dos poluentes atmosféricos.

Esse conjunto de evidências reforça a interpretação de que o pico do SEES em 2024 resultou da coocorrência não linear entre condições de RUV, calor e poluição atmosférica, tal como eventos climáticos compostos (Zscheischler et al., 2018; IPCC, 2022). Nesse sentido, o SEES pode ser posicionado teoricamente como um índice de exposição composta ambiental à saúde da pele, combinando o efeito simultâneo de diversas ameaças meteorológicas.

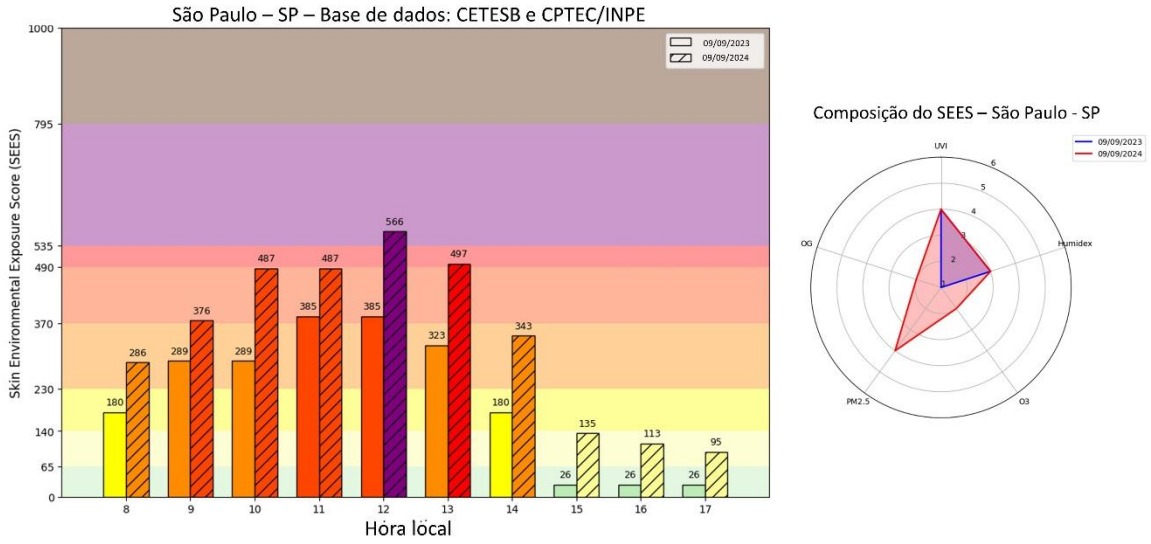


Figura 1.5 - Variação horária do *Skin Environmental Exposure Score* (SEES) em 09 de setembro nos anos de 2023 e 2024 em São Paulo, SP. O gráfico de barras (esquerda) mostra os valores do SEES entre às 8h e 17h, com as cores de fundo indicando as categorias de risco. O gráfico de radar (direita) mostra a contribuição individual de cada um dos fatores ambientais (UVI, Humidex, O_3, PM2.5, e OG) no valor máximo do SEES observado nestas datas.

A Figura 1.6 demonstra a evolução temporal do SEES no Rio de Janeiro durante um evento de calor recorde documentado pela mídia nacional (COR, 2025; G1, 2025). Embora os valores de pico do SEES tenham atingido a categoria "Muito Alto" próximo ao meio-dia solar, de forma mais notável, o SEES permaneceu elevado em níveis de "Moderado" a "Muito Alto" das 08:00 às 15:00 (hora local), indicando condições de exposição crítica prolongadas ao longo das horas do dia.

A análise da composição do SEES via gráfico de radar revela que este evento foi impulsionado exclusivamente pelo estresse térmico extremo (H muito alto) e pelo UVI, sem contribuições significativas de poluentes atmosféricos. Apesar da ausência de níveis exacerbados de poluição, a interação sinérgica entre a temperatura elevada e o UVI criou condições particularmente adversas para a saúde cutânea.

Essas descobertas destacam um padrão emergente de riscos à saúde relacionados ao clima, onde os avisos tradicionais de exposição ao meio-dia podem subestimar o dano diário cumulativo. À medida que o aquecimento global e os efeitos das ilhas de calor urbanas se intensificam, projeta-se que tais eventos de exposição prolongada aumentem em frequência, posicionando o SEES como uma ferramenta crucial tanto para avisos de saúde pública em tempo real quanto para estratégias de adaptação climática urbana de longo prazo. O estudo de caso do Rio de Janeiro exemplifica como, mesmo na ausência de poluição extrema, a combinação de estresses térmicos e radiativos pode sustentar janelas de exposição perigosas, demandando a revisão das diretrizes de proteção.

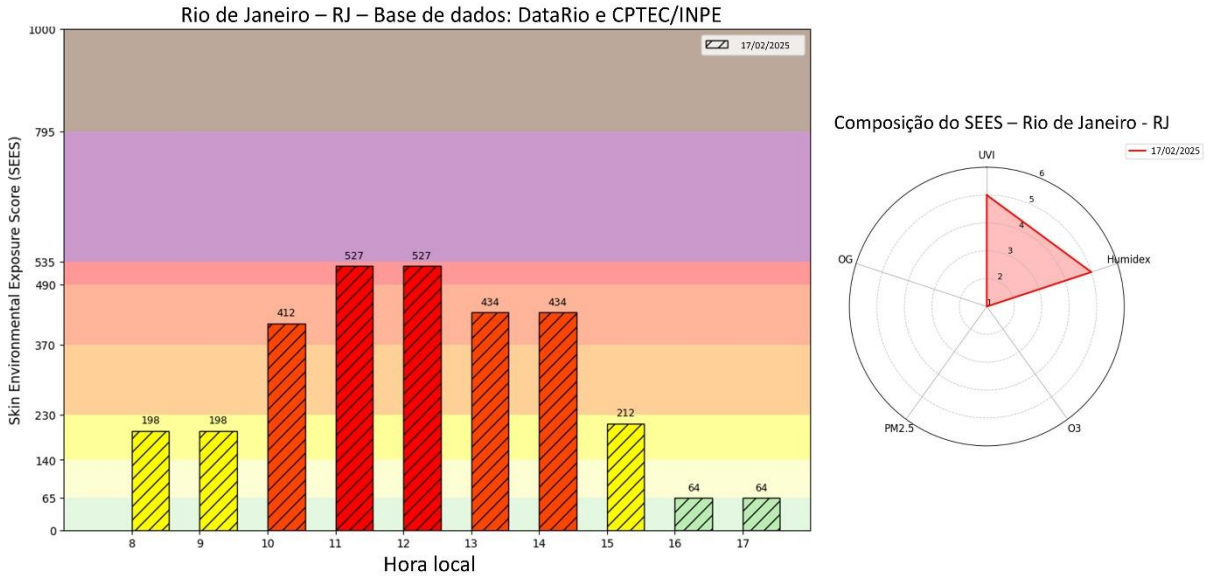


Figura 1.6 - Variação horária do *Skin Environmental Exposure Score* (SEES) em 17 de fevereiro de 2025 no Rio de Janeiro, RJ. O gráfico de barras (esquerda) mostra os valores do SEES entre às 8h e 17h, com as cores de fundo indicando as categorias de risco. O gráfico de

radar (direita) mostra a contribuição individual de cada um dos fatores ambientais (UVI, Humidex, O_3, $PM_{2.5}$, e OG) no valor máximo do SEES observado nesta data.

Tanto em São Paulo quanto no Rio de Janeiro, os valores do SEES refletem a hierarquia baseada em danos definida na Seção 1.2.4. Essa seção também discute como este esquema de ponderação pode ser adaptado ou re-calibrado para outros contextos ambientais ou demográficos, o que é crítico ao estender essas aplicações além dos presentes estudos de caso.

A avaliação comparativa de eventos extremos em São Paulo e no Rio de Janeiro demonstra a robusta capacidade do SEES de capturar perfis de risco ambiental distintos que afetam a saúde cutânea. Durante condições de ondas de calor caracterizadas por céus limpos e estabilidade atmosférica, o SEES identificou efetivamente riscos elevados impulsionados primariamente pela RUV e pelo estresse térmico. Em paralelo, o SEES refletiu com precisão a amplificação do risco causada predominantemente por altas concentrações de $PM_{2.5}$ em episódios de poluição extrema.

Em termos práticos, os perfis contrastantes observados em São Paulo e no Rio de Janeiro ilustram como o SEES pode informar respostas de saúde pública diferenciadas para episódios de poluição versus eventos de calor extremo. Esta dupla sensibilidade posiciona o SEES como uma ferramenta singularmente versátil para o monitoramento da saúde ambiental, capaz de gerar alertas específicos para cada cenário, adaptados a diferentes populações vulneráveis. Ao contabilizar simultaneamente estressores climáticos e relacionados à poluição, esta métrica fornece uma estrutura abrangente que supera as avaliações de risco convencionais de fator único. Esses atributos estabelecem o SEES como um instrumento estratégico para o desenvolvimento de políticas de saúde pública direcionadas e estratégias preventivas diante dos crescentes desafios ambientais.

1.4. CONCLUSÕES

O *Skin Environmental Exposure Score* (SEES) introduzido neste estudo fornece uma quantificação integrada dos riscos ambientais para a saúde da pele, ao combinar RUV, poluição do ar e estresse térmico em uma métrica única baseada em F-AHP. O SEES aborda lacunas críticas nos índices ambientais existentes, que tradicionalmente avaliam esses fatores de forma isolada. O esquema de ponderação hierárquica prioriza a RUV devido à sua carcinogenicidade bem documentada, seguida pelo ozônio, estresse térmico e material particulado, garantindo que a pontuação reflita seu dano dermatológico relativo e capture as interações sinérgicas entre os estressores em condições de exposição do mundo real.

Globalmente, o SEES identifica condições de alto risco em áreas tropicais e subtropicais onde a poluição e o calor exacerbam os efeitos da RUV, bem como em centros urbanos com níveis elevados de $PM_{2.5}$ e O_3. Análises sazonais e diurnas revelam que valores extremos de SEES tendem a ocorrer durante o verão e por volta do meio-dia solar, com situações particularmente críticas em regiões como o Oriente Médio, Sul da Ásia e os Andes, enquanto estudos de caso brasileiros em São Paulo e no Rio de Janeiro mostram a sensibilidade da pontuação tanto a episódios dominados pela poluição quanto a ondas de calor intensas, ressaltando sua versatilidade para a avaliação de risco localizada. Do ponto de vista da gestão de riscos, a persistência de níveis de SEES de "Moderado" a "Alto" fora do pico tradicional do meio-dia sustenta a necessidade de revisar as mensagens de proteção que focam apenas em uma janela de tempo estreita.

A metodologia do SEES, apoiada por verificações de consistência e análises de sensibilidade, fornece uma base robusta para avisos de saúde pública e estratégias de adaptação climática, permitindo alertas específicos para cenários para populações vulneráveis e informando respostas aos efeitos combinados das mudanças climáticas e da urbanização na saúde da pele. Pesquisas futuras devem investigar as tendências de longo prazo do SEES sob diferentes cenários climáticos e estender a estrutura para incorporar poluentes adicionais, como COVs e partículas ultrafinas, conforme dados adequados se tornem amplamente disponíveis.

Ao unir as perspectivas ambiental e dermatológica, o SEES estabelece uma estrutura escalável e baseada em evidências para orientar medidas de proteção direcionadas e mitigar danos cutâneos multifatoriais. Sua integração em sistemas de monitoramento rotineiros poderia apoiar intervenções de saúde pública em tempo real e campanhas de educação ambiental, particularmente em regiões tropicais e altamente urbanizadas, por meio de ferramentas de comunicação intuitivas, como faixas de risco codificadas por cores para agências, escolas e meios de comunicação. A longo prazo, climatologias baseadas no SEES podem ajudar a identificar pontos críticos (*hotspots*) de exposição crônica, avaliar os benefícios das políticas de mitigação e desenhar estratégias focadas para populações em risco, complementando os índices existentes de RUV e qualidade do ar com uma visão mais holística das exposições ambientais relevantes para a pele.

1.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKASH, S. H.; SARKAR, S. K.; BINDAJAM, A. A.; KUMARI, R.; TALUKDAR, S.; MALLICK, J. Assessment of coastal vulnerability using integrated fuzzy analytical hierarchy process and geospatial technology for effective coastal Management. **Environmental Science And Pollution Research**, v. 31, p. 53749–53766, 2024. DOI: 10.1007/s11356-023-28317-y.

APPENZELLER, B. M. R.; TSATSAKIS, A. M. Hair analysis for biomonitoring of environmental and occupational exposure to organic pollutants: state of the art, critical review and future needs. **Toxicology Letters**, v. 210, n.2, p. 119-140, 2012. DOI: 10.1016/j.toxlet.2011.10.021.

BAUDOUIN, C.; CHARVERON, M.; TARROUX, R.; GALL, Y. Environmental pollutants and skin cancer. **Cell Biology and Toxicology**, v. 18, p. 341–348, 2002. DOI: 10.1023/a:1019540316060.

BUCKLEY, J. J. Fuzzy hierarchical analysis. **Fuzzy Sets and Systems**, v. 17, n. 3, p. 233-247, 1985. DOI: 10.1016/0165-0114(85)90090-9.

BOLLASINA, M. A.; MING, Y.; RAMASWAMY, V.; SCHWARZKOPF, M. D.; NAIK, V. Contribution of local and remote anthropogenic aerosols to the twentieth century weakening of the South Asian Monsoon. **Geophysical Research Letters**, v. 41, n. 2, p. 680-687, 2014. DOI: 10.1002/2013GL058183.

BOTTERO, M.; DATOLA, G.; MONACO, R. Addressing complex challenges in transformations and planning: A fuzzy-based multicriteria spatial decision support system. **Land Use Policy**, v. 99, p. 104829, 2020. DOI: 10.1016/j.landusepol.2020.104829.

CECCHI, L.; D'AMATO, G.; ANNESI-MAESANO, I. External exposome and allergic respiratory and skin diseases. **Journal of Allergy and Clinical Immunology**, v. 141, n. 3, p. 846 – 857, 2018. DOI: 10.1016/j.jaci.2018.01.016

CHANG, D. Y. Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP. **European Journal of Operational Research,** v. 95, n. 3, p. 649-655, 1996. DOI: 10.1016/0377-2217(95)00300-2.

CHANG, D. E.; CHEN, S. M. A new method for handling risk factors in supplier selection using fuzzy AHP. **Expert Systems with Applications**, v. 38, n. 3, p. 2358-2365, 2011. DOI: 10.1016/j.eswa.2010.08.064.

CNN BRASIL. São Paulo é a cidade mais poluída do mundo e a única com ar insalubre para todos. CNN Brasil, 9 set. 2024. Disponível em: https://www.cnnbrasil.com.br/nacional/sao-paulo-e-a-cidade-mais-poluida-do-mundo-e-unica-com-ar-insalubre-para-todos/. Acesso em: 9 abr. 2025.

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. DOI: 10.1590/abd1806-4841.20154089.

CORRÊA, M. P.; MARCIANO, A. G.; CARVALHO, V. S. B.; SOUZA, P. M. B.; RIPPER, J.

S. C.; ROY, 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.

DE VECCHI, R.; RIPPER, J. S. C.; ROY, D.; BRETON, L.; MARCIANO, A. G.; SOUZA, P. M. B. S.; CORRÊA, M. P. Using wearable devices for assessing the impacts of hair exposome in Brazil. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 1–10, 2019. DOI: 10.1038/s41598-019-49902-7.

DIEDHIOU, A.; BICHET, A.; WARTENBURGER, R.; SENEVIRATNE, S. I.; ROWELL, D. P.; SYLLA, M. B.; DIALLO, I.; TODZO, S.; TOURÉ, N. E.; CAMARA, M.; NGOUNOU NGATCHAH, B.; KANE, N. A.; TALL, L.; AFFHOLDER, F. Changes in climate Extremos over West and Central Africa at 1.5 °C and 2 °C global warming. **Environmental Research Letters**, v. 13, n. 6, p. 065020, 2018. DOI**:** 10.1088/1748-9326/aac3e5.

DRAKAKI, E.; DESSINIOTI, C.; ANTONIOU, C. V. Air pollution and the skin. **Frontiers in Environmental Science**, v. 2, n. 11, p. 2-6, 2014. DOI: 10.3389/fenvs.2014.00011.
ECHEVARRÍA-LUCAS, L.; SENCIALES-GONZÁLEZ, J.M.; MEDIALDEA-HURTADO, M.E.;
RODRIGO-COMINO, J. Impact of Climate Change on Eye Diseases and Associated Economical Costs. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 18, p. 7197, 2017. DOI: 10.3390/ijerph18137197.

ENVIRONMENT AND CLIMATE CHANGE CANADA. Spring and summer weather hazards: humidex table. Toronto: Department of National Defence, 2016. Disponível em: <http://www.ec.gc.ca/meteo-weather/default.asp>. Acesso em: October 2, 2023.

FAYIGA, A. O.; IPINMOROTI, M. O.; CHIRENJE, T. Environmental pollution in Africa. **Environment, Development and Sustainability**, v. 20, p. 41-73, 2017. DOI: 10.1007/s10668-016-9894-4.

FERRARA, F.; WOODBY, B.; PECORELLI, A.; SCHIAVONE, M. L.; PAMBIANCHI, E.; MESSANO, N.; THERRIEN, J.-P.; CHOUDHARY, H.; VALACCHI, G. Additive effect of combined pollutants to UV induced skin OxInflammation damage: evaluating the protective topical application of a cosmeceutical mixture formulation. **Redox Biology**, v. 34, p. 101481, 2020. DOI: 10.1016/j.redox.2020.101481.

FOTSO-NGUEMO, T. C.; VONDOU, D. A.; DIALLO, I.; DIEDHIOU, A.; WEBER, T.; TANESSONG, R. S.; NGHONDA, J. P.; YEPDO, Z. D. Potential impact of 1.5, 2 and 3 °C 43 global warming levels on heat and discomfort indices changes over Central Africa. **Science of The Total Environment**, v. 804, p. 150099, 2022. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.150099.

GARZÓN-MOSQUERA, J. C.; ARAGÓN-VARGAS, L. F. Exercise-induced local sweating: Greater reduction in women than men with sunscreen use. **Temperature**, v. 12(1), p. 28–39. 2024. DOI: 10.1080/23328940.2024.2396198.

G1 RIO DE JANEIRO. Rio registra a temperatura mais alta do verão. G1, 17 fev. 2025. Disponível em: https://g1.globo.com/rj/rio-de-janeiro/noticia/2025/02/17/rio-registra-temperatura-mais-alta-do-verao.ghtml. Acesso em: 9 abr. 2025.

G1 SÃO PAULO. Poluição atípica coloca São Paulo entre os centros urbanos mais poluídos

do mundo nesta segunda-feira, diz empresa suíça. G1, 9 set. 2024. Disponível em: https://g1.globo.com/sp/sao-paulo/noticia/2024/09/09/poluicao-atipica-coloca-sao-paulo-entre-os-centros-urbanos-mais-poluidos-do-mundo-nesta-segunda-diz-empresa-suica.ghtml. Acesso em: 9 abr. 2025.

GELARO, R. The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2). **Journal of Climate**, v. 30, n. 14, p. 5419-5454, 2017. DOI: 10.1175/JCLI-D-16-0758.1.

HAN, J.; KAMBER, M.; PEI, J. Data Mining: Concepts and Techniques. 3. ed. **Morgan Kaufmann**, 2011. ISBN 978-0123814791.

HERSBACH, H.; BELL, B.; BERRISFORD, P.; HIRAHARA, S.; HORÁNYI, A.; MUÑOZ SABATER, J.; NICOLAS, J.; PEUBEY, C.; RADU, R.; SCHEPERS, D.; SIMMONS, A.; SOCI, C.; ABDALLA, S.; ABELLAN, X.; BALSAMO, G.; BECHTOLD, P.; BIAVATI, G.; BIDLOT, J.; BONAVITA, M.; DE CHIARA, G.; DAHLGREN, P.; DEE, D.; DIAMANTAKIS, M.; DRAGANI, R.; FLEMMING, J.; FORBES, R.; FUENTES, M.; GEER, A.; HAIMBERGER, L.; HEALY, S.; HOGAN, R. J.; HÓLM, E.; JANISKOVÁ, M.; KEELEY, S.; LALOYAUX, P.; LOPEZ, P.; LUPU, C.; RADNOTI, G.; DE ROSNAY, P.; ROZUM, I.; VAMBORG, F.; VILLAUME, S.; THÉPAUT, J.-N. The ERA5 global reanalysis. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 146, n. 730, p. 1999-2049, 2020. DOI: 10.1002/qj.3803.

IARC. Outdoor air pollution. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans Volume 109, 100D, 2015, 449 p. https://publications.iarc.fr/73.

IARC. Solar and Ultraviolet Radiation. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans Volume 55, 100D, 1992, 319 p. https://publications.iarc.fr/73.

JIYING, W.; BERAUD, J.-J. D.; ZHAO, X. Investigating the impact of air pollution in selected African developing countries. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 30, p. 64460–64471, 2023. DOI: 10.1007/s11356-023-26998-z.

KHOURI, L.; AL-MOUFTI, M. B. Selection of suitable aggregation function for estimation of water quality index for the Orontes River. **Ecological Indicators**, v. 142, p. 109290, 2022. DOI: 10.1016/j.ecolind.2022.109290.

KRUTMANN, J.; BOULOC, A.; SORE, G.; BERNARD, B. A.; PASSERON, T. The skin aging exposome. **Journal of Dermatological Science**, v. 85, n. 3, p. 152-161, 2017. DOI: 10.1016/j.jdermsci.2016.09.015.

LAU, K.M.; KIM, M.K.; KIM, K.M. Asian summer monsoon anomalies induced by aerosol direct forcing: the role of the Tibetan Plateau. **Climate Dynamics**, v. 26, p. 855-864, 2006. DOI:10.1007/s00382-006-0114-z.

LEE, W. Photoaggravation of hair aging. **International Journal of Trichology**, v. 1, n. 2, p. 94-99, 2009. DOI: 10.4103/0974-7753.58551.

LI, L.; SHI, Z.-H.; YIN, W; ZHU, D.; NG, S.L.; CAI, C.-F.; LEI, A-L. A fuzzy analytic hierarchy process (FAHP) approach to eco-environmental vulnerability assessment for the danjiangkou reservoir area, China. Ecological Modelling, v. 220(23), p. 3439-3447, 2009. DOI:

10.1016/j.ecolmodel.2009.09.005.

LI, A.; FAN, L.; XIE, L.; REN, Y.; LI, L. Associations between air pollution, climate factors and outpatient visits for eczema in West China Hospital, Chengdu, south-western China: a time series analysis. **Journal of the European Academy of Dermatology and Venereology**, v. 32, n. 3, p. 486-494, 2017. DOI: 10.1111/jdv.14730.

LIANG, J.; LIU, L.; KANG, X.; HU, F.; MAO, L. Mechanism underlying the effect of SO2-induced oxidation on human skin keratinocytes. **Medicine (Baltimore)**, v. 99, n. 48, p. e23152, 2020. DOI: 10.1097/MD.0000000000023152.

LÖFGREN, S. Solar ultraviolet radiation cataract. **Experimental Eye Research**, v. 156, p. 112-116, 2017. DOI: 10.1016/j.exer.2016.05.026.

MADRONICH, S.; FLOCKE, S. Theoretical estimation of biologically effective UV radiation at the Earth's surface. In: ZEREFOS, C. S.; BAIS, A. F. (Eds.). Solar Ultraviolet Radiation. Berlin, Heidelberg: Springer, 1997. (NATO ASI Series, v. 52). DOI: 10.1007/978-3-662-03375-3_3.

MALIK, S.; KHAN, M. Z.; ALI, G.; ALI, S. A hybrid fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS approach for evaluating health and safety performance in the construction industry. **Expert Systems With Applications**, v. 161, p. 113701, 2020. DOI: 10.1016/j.eswa.2020.113701.

MANCEBO, S. E.; WANG, S. Q. Recognizing the impact of ambient air pollution on skin health. **Journal of The European Academy of Dermatology and Venereology**, v. 29, n. 12, p. 2326-2332, 2015. DOI: 10.1111/jdv.13250.

MASTERTON, J. M.; RICHARDSON, F. A. "Humidex: a method of quantifying human discomfort due to excessive heat and humidity". **Environment Canada**, CLI 1-79. Downsview: Atmospheric Environmental Service, Ontário, 1979.

MCKINLAY, AF; DIFFEY, BL. A reference action spectrum for ultra-violet induced erythema in human skin, in Human Exposure to Ultraviolet Radiation: Risks and Regulations, ed. W. F. Passchier and B. F. M. Bosnajakovic, Elsevier, Amsterdam, 1987, pp. 83–87.

MILLEN, A. E.; DIGHE, S.; KORDAS, K.; AMINIGO, B. Z.; ZAFRON, M. L.; MU, L. Air Pollution and Chronic Eye Disease in Adults: A Scoping Review. **Ophthalmic Epidemiology**, v. 31(1), p. 1-10. DOI: 10.1080/09286586.2023.2183513.

NATIONAL INSTITUTE FOR SPACE RESEARCH (INPE). Ultraviolet Index. Disponível em: https://satelite.cptec.inpe.br/uv/. Acesso em: April 9, 2025.

NEALE, R.E.; LUCAS, R.M.; BYRNE, S.N.; HOLLESTEIN, L.; RHODES, E.; YAZAR, S.; YOUNG, A. R.; BERWICK, M.; IRELAND, R. A.; OLSEN, C. M. The effects of exposure to solar radiation on human health. **Photochemical Photobiologycal Sciences,** v. 22, 1011–1047 (2023). DOI: 10.1007/s43630-023-00375-8

PASSERON, T.; KRUTMANN, J.; ANDERSEN, M. L.; KATTA, R.; ZOUBOULIS, C. C. Clinical and biological impact of the exposome on the skin. **Journal of The European Academy of Dermatology and Venereology**, v. 34, p. 4–25, 2020. DOI: 10.1111/jdv.16614.

PASSERON, T.; ZOUBOULIS, C. C.; TAN, J.; ANDERSEN, M. L.; KATTA, R.; LYU, X.; AGUILAR, L.; KEROB, D.; MORITA, A.; KRUTMANN, J.; PETERS, E.M.J. Adult skin acute stress responses to short-term environmental and internal aggression from exposome factors. **Journal of the European Academy of Dermatology and Venereology**, v. 35, n. 10, p. 1963–1975, 2021. DOI: 10.1111/jdv.17432.

PETKOVA, E. P.; JACK, D. W.; VOLAVKA-CLOSE, N. H.; KINNEY, P. L. Particulate matter pollution in African cities. **Air Quality, Atmosphere & Health**, v. 6, p. 603-614, 2013. DOI:10.1007/s11869-013-0199-6.

PHILIPPON, N.; DE LAPPARENT, B.; GOND, V.; SÈZE, G.; MARTINY, N.; CAMBERLIN, P.; CORNU, G.; MOREL, B.; MORON, V.; BIGOT, S.; BROU, T.; DUBREUIL, V. Analysis of the diurnal cycles for a better understanding of the mean annual cycle of forests greenness in Central Africa. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 223, p. 81-94, 2016. DOI: 10.1016/j.agrformet.2016.04.005.

POMPEU, C. R.; PEÑAS, F. J.; GOLDENBERG-VILAR, A.; ÁLVAREZ-CABRIA, M.; BARQUÍN, J. Assessing the effects of irrigation and hydropower dams on river communities using taxonomic and multiple trait-based approaches. **Ecological Indicators**, v. 145, p. 109290, 2022. DOI: 10.1016/j.ecolind.2022.109290.

RIO OPERATIONS CENTER. Rio records a Alto of 44°C this Monday (02/17); city remains without rain forecast for the coming days. **COR.RIO**, Feb. 17, 2025. Disponível em: https://cor.rio/rio-registra-maxima-de-44c-nesta-segunda-17-02-cidade-segue-sem-previsao-de-chuva-para-os-proximos-dias/. Acesso em: April 9, 2025.

RIVAS, M.; ROJAS, E.; LAROZE, D.; PÉREZ, L. M.; CORRÊA, M. P. Muito Alto erythemal doses of ultraviolet radiation around solar noon measured in Arica, northern Chile. **Atmósfera**, v. 37, p. 475-480, 2023. DOI: 10.20937/atm.53184.

ROBERTS, W. Air pollution and skin disorders. **International Journal of Women's Dermatology**, v. 7, n.1, p. 91-97, 2021. 10.1016/j.ijwd.2020.11.001[.

SAATY, R. W. The Analytic Hierarchy Process – What it is and how it is used. **Applied Mathematical Modelling**, v. 9, n. 3-5, p. 161-176, 1987. DOI: 10.1016/0270-0255(87)90473-8.

SAATY, T. L. Making and validating complex decisions with the AHP/ANP. **Journal of Systems Science and Systems Engineering**, v. 14, p. 1-36, 2005. DOI: 10.1007/s11518-006-0179-6.

SAATY, T. L.; VARGAS, L. G. Decision Making with the Analytic Network Process: Economic, Political, Social and Technological Applications with Benefits, Opportunities, Costs and Risks. Second Edition. Nova York: Springer, 2013. DOI: 10.1007/0-387-33987-6.

SALAS, L. F. S.; ROJAS, J. L. F.; PEREIRA FILHO, A. J.; Karam, H. A. Ultraviolet solar radiation in the tropical central Andes (12.0°S). **Photochemical & Photobiological Sciences**, v. 16, n. 6, p. 954–971, 2017. DOI: 10.1039/C6PP00161K.

SÃO PAULO STATE ENVIRONMENTAL COMPANY (CETESB). Monthly Air Quality Report: September 2024. **CETESB**, 2024. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/ar/wp-content/uploads/sites/28/2024/10/Boletim-Mensal_setembro2024.pdf. Acesso em: April 9, 2025.

SINGH, C.; GANGULY, D.; SHARMA, P.; MISHRA, S. Climate response of the south Asian monsoon system to West Asia, Tibetan Plateau and local dust emissions. **Climate Dynamics**, v. 53, n. 9-10, p. 6245-6264, 2019. DOI: 10.1007/s00382-019-04925-8.

SRDJEVIC, B.; MEDEIROS, Y. D. P. Fuzzy AHP assessment of water management plans. **Water Resources Management**, v. 22, p. 877–894, 2008. DOI: 10.1007/s11269-007-9197-5.

TAGLIAFERRO, S.; MAIO, S.; PIRONA, F. ET AL. Assessing external exposome by implementing an Environmental Data Management System using Open Data. **Scientific Reports**, v. 14, 17142, 2024. DOI: 10.1038/s41598-024-62924-0.

THIELE, J. J.; TRABER, M. G.; TSANG, K.; CROSS, C. E.; PACKER, L. In vivo exposure to ozone depletes vitamins C and E and induces lipid peroxidation in epidermal layers of murine skin. **Free Radical Biology and Medicine**, v. 23, n. 3, p. 385–391, 1997. DOI: 10.1016/S0891-5849(97)00048-6.

VAN DER LEUN J.C.; PIACENTINI, R.D.; de GRUIJL F.R. Climate change and human skin cancer. **Photochemical & Photobiological Sciences**, 7, 730-733, 2008. DOI: 10.1039/b719302e.

VAN LAARHOVEN, P. J. M.; PEDRYCZ, W. A fuzzy extension of Saaty's priority theory. **FUZZY SETS AND SYSTEMS**, v. 11, n. 1-3, p. 199-227, 1983. DOI: 10.1016/S0165-0114(83)80082-7.

VASILATOU, V.; DIAPOULI, E.; ABATZOGLOU, D.; BAKEAS, E. B.; SCOULLOS, M.; ELEFTHERIADIS, K. Characterization of PM2.5 chemical composition at the Demokritos suburban station, in Athens Greece. The influence of Saharan dust. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 24, n. 12, p. 11836-11846, 2017. DOI: 10.1007/s11356-017-8684-3.

WHO. **Air quality guidelines – global update 2005: particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide**. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe; 2006.

WHO. **Global Solar UV Index: A Practical Guide**. Geneva: World Health Organization (WHO), World Meteorological Organization (WMO), United Nations Environment Program (UNEP), and International Commission on Non-Ionising Radiation Protection (ICNRP), 2002.

WILD, C. P. Complementing the genome with an “exposome”: the outstanding challenge of environmental exposure measurement in molecular epidemiology. **Cancer Epidemiology, Biomarkers & Prevention**, v. 14, n. 8, p. 1847–1850, 2005. DOI: 10.1158/1055-9965.EPI-05-0456.

WILD, C. P. The exposome: from concept to utility. **International Journal of Epidemiology**, v. 41, n. 1, p. 24–32, 2012. DOI: 10.1093/ije/dyr236.

YANG, W.; SEAGER, R.; CANE, M. A.; LYON, B. The Annual Cycle of East African

Precipitation. **American Meteorological Society**, v. 28, p. 2385-2404, 2015. DOI: 10.1175/JCLI-D-14-00484.1.

ZARATTI, F., PIACENTINI, R.D., GUILLEN, H.A. et al. Proposal for a modification of the UVI risk scale. **Photochem Photobiol Sci**, v. 13, p. 980-985, 2014. DOI: 10.1039/c4pp00006d.

ZHANG, J. J.; WEI, Y.; FANG, Z. Ozone Pollution: A Major Health Hazard Worldwide. **Frontiers in Immunology**, v. 10, p. 2518, 2019. DOI: 10.3389/fimmu.2019.02518.

ZHANG, H.; LI, Y.; LIU, J.; YANG, J. Integrated fuzzy decision-making methodology with intuitionistic fuzzy sets for medical laboratory disaster preparedness. **Expert Systems with Applications**, v. 229, p. 120792, 2024. DOI: 10.1016/j.eswa.2024.120792.

ZHAO, Q.; LIAN, Z.; LAI, D. Thermal comfort models and their developments: A review. **Energy and Built Environment**, v. 2, n.1, p. 21-33, 2021. DOI: 10.1016/j.enbenv.2020.05.007.

ZHOU, L.; WANG, J.; WANG, J.; CHEN, X.; WANG, X. A comprehensive risk assessment of water resources using a fuzzy-AHP method in the context of climate change. **Science of the total environment**, v. 920, p. 178245, 2024. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.178245.

CAPÍTULO II

AVALIAÇÃO GLOBAL DOS RISCOS À SAÚDE DA PELE ASSOCIADOS ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS A PARTIR DE UM ESCORE INTEGRADO DE EXPOSIÇÃO AMBIENTAL.

(Bastos I.R.P; Corrêa M.P. Global Risks to Skin Health under Climate Change: An Integrated Environmental Exposure Perspective, **Photochemical & Photobiological Sciences**, em revisão, 2026)

2.1. INTRODUÇÃO

Como descrito no Capítulo I, a exposição simultânea a estressores ambientais, incluindo RUV, variáveis meteorológicas e poluentes atmosféricos, potencializa os efeitos adversos sobre a pele e seus anexos por meio de interações sinérgicas (Marrot, 2018; Chen et al., 2021). Esses agentes atuam de forma integrada, amplificando processos de estresse oxidativo, inflamação e comprometimento da barreira cutânea, com impactos relevantes sobre a saúde cutânea e capilar (WHO, 2012; Monselise et al., 2017; Puri et al., 2017; Vecchi et al., 2019; Ferrara et al., 2021).

Nesse contexto, as mudanças climáticas representam um importante fator de intensificação desses estressores ambientais. As alterações ambientais impulsionadas pelas mudanças climáticas afetam a capacidade da pele de manter a homeostase, contribuindo para o surgimento e agravamento de diversas doenças dermatológicas (Zieneldien et al., 2025). O aumento da temperatura média global, as alterações nos regimes de precipitação, a maior frequência e intensidade das ondas de calor e as mudanças na dinâmica atmosférica modificam significativamente as condições ambientais às quais a população está exposta (IPCC, 2022).

Além disso, alterações na cobertura de nuvens, na concentração de aerossóis atmosféricos e no O_3 estratosférico podem influenciar a distribuição espacial e temporal da RUV na superfície terrestre (Yamamoto et al., 2024a). Paralelamente, o aquecimento global favorece condições atmosféricas propícias à formação e ao acúmulo de poluentes atmosféricos (Horton et al., 2014) especialmente em áreas urbanas e regiões sujeitas a queimadas e eventos de estabilidade atmosférica (Tian et al., 2023).

Essas alterações ambientais têm sido associadas ao aumento do envelhecimento cutâneo precoce, à exacerbação de dermatoses inflamatórias, ao comprometimento da função de barreira da pele e ao agravamento de doenças relacionadas ao expossoma cutâneo (Lin et al., 2019; Belzer e Parker, 2023). Além disso, evidências recentes indicam que os efeitos combinados

entre calor extremo, poluição atmosférica e RUV podem potencializar danos biológicos (Corrêa et al., 2021) quando comparados às exposições isoladas, reforçando a necessidade de abordagens integradas para avaliação dos riscos ambientais futuros à saúde da pele.

Estamos, portanto, diante de um cenário de riscos ambientais à pele que vai além da única preocupação com a exposição excessiva ao Sol (Krutmann et al., 2017; Passeron et al., 2020). Por essa razão, os cuidados com a saúde da pele não podem ficar restritos ao conceito simplista de fotoproteção, palavra cuja etimologia explica sua limitação: o prefixo foto, do grego *phos, photos*, significa "luz" e o sufixo proteção, do latim *protectio, protectionis*, deriva do verbo *protegere*, significa "cobrir", "proteger", "defender". Assim, a avaliação do efeito sinérgico da exposição a diferentes variáveis ambientais é imprescindível para o aperfeiçoamento de estratégias de adaptação e mitigação para proteger a saúde humana (Watson et al., 2024).

A carência de estudos sobre a sinergia entre a exposição ambiental e a saúde da pele é a principal motivação deste trabalho. Neste estudo, usamos o *Skin Environmental Exposure Score* (SEES) (Corrêa et al., 2026), apresentado no capítulo I, em escalas global e local, para avaliar os impactos futuros das mudanças climáticas sobre a saúde da pele humana. Para os prognósticos, usamos dados do *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6* (CMIP6) (Eyring et al, 2016) tradicionalmente utilizados em análises de projeções, como por exemplo, gases de efeito estufa, aerossóis e cobertura de nuvens (Yamamoto et al., 2024b), índices climáticos extremos (Kim et al., 2020; Zhu et al., 2020) ou índices climáticos que influenciam a segurança alimentar, a resiliência da infraestrutura e a saúde humana (Bourdeau-Goulet e Hassanzadeh, 2021).

Essa abordagem visa avaliar como as temperaturas elevadas e a poluição urbana podem estender os episódios de risco, geralmente associados apenas à alta disponibilidade de radiação solar, para diferentes regiões, horários do dia e períodos do ano. Em resumo, esse estudo propôs, por meio de um score quantitativo: i) avaliar os potenciais riscos aumentados pelas mudanças climáticas à saúde da pele; e, ii) identificar quais variáveis ambientais apresentam maior contribuição para o aumento do risco até o final do século XXI. Com base nesses resultados, propomos novas medidas de proteção, visando subsidiar estratégias de adaptação e redução da exposição.

2.2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.2.1. Base de dados: simulações e projeções futuras

De modo a avaliar os riscos ambientais à saúde da pele, o SEES (Equação 1.19) foi estimado para o período histórico de referência (HP, 1980-2014) e para dois períodos ao longo do século XXI: futuro próximo (FP, 2040-2050) e futuro distante (FD, 2090-2100). Para as simulações e projeções foram utilizados dados de dois modelos do sistema terrestre (ESM; Tabela 2.1) provenientes do CMIP6 (Krasting et al., 2018; John et al., 2018; Yukimoto et al., 2019a,b) e obtidos via *Earth System Grid Federation* (ESGF). A escolha dos ESMs se deu em função da disponibilidade das variáveis no conjunto de dados.

Para o HP, foram utilizadas simulações e, para os cenários futuros (FP e FD), as projeções. Ambas baseadas, a partir da disponibilidade de dados, no *ensemble* de dois modelos do sistema terrestre (ESMs) do CMIP6 (Krasting et al., 2018; John et al., 2018; Yukimoto et al., 2019a,b), obtidos via *Earth System Grid Federation* (ESGF), sob o cenário SSP5-8.5.

Tabela 2. 1 - Variáveis e modelos climáticos utilizados neste estudo para simulação do clima presente e projeção do clima futuro.

Modelo/Reanálise	Resolução horizontal e níveis verticais	Variáveis utilizadas (unidade)
GFDL-ESM4	1.0° × 1.2°; 49	AOD550 (ad) O3 (mol mol^{-1}) ps (Pa) mmrpm2p5 (kg kg^{-1}) so2 (mol mol^{-1}) tas (K) hurs (%)
MRI-ESM2-0	2.8° × 2.8°; 80	

Legenda: AOD550: profundidade óptica de aerossóis a 550 nm; O3: razão de mistura de ozônio; ps: pressão à superfície; mmrpm2p5: concentração de material particulado fino (PM2.5); so2: razão de mistura de dióxido de enxofre; tas: temperatura do ar; hurs: umidade relativa;

Os dados de O_3 e SO_2 em superfície, originalmente fornecidos como razão de mistura de massa, foram convertidos em concentração de massa (kg m^{-3}). Adicionalmente, o conteúdo total de ozônio (CTO), definido a partir da quantidade de moléculas de O_3 concentradas na coluna atmosférica, da superfície da Terra ao topo da estratosfera, expresso em Unidades

Dobson (DU), foi derivado a partir da integração vertical da fração molar de O_3 ao longo da atmosfera, para cada instante temporal e ponto de grade. Dados de CTO e AOD550 foram utilizados como input no modelo para estimativa da incidência de RUV em superfície, seguindo a abordagem de Yamamoto et al. (2024a).

Os dados do CMIP6 dividem-se em simulações históricas e projeções futuras. As simulações representam o clima do passado recente, entre 1980 e 2014, levando em conta forçantes naturais e antrópicas. Por outro lado, as projeções indicam possíveis condições do clima até o final do século XXI, baseando-se nos *Shared Socioeconomic Pathways* (SSPs) (Riahi et al., 2017), que são cenários que descrevem diferentes possibilidades de evolução da sociedade, com maior ou menor esforço para reduzir as emissões de gases de efeito estufa.

Para este estudo, optamos por utilizar exclusivamente o cenário SSP5-8.5, que descreve um futuro de desenvolvimento global impulsionado por combustíveis fósseis e pouca cooperação, resultando em altas emissões de gases de efeito estufa e no maior aquecimento global projetado, com forçantes radiativas de 8.5 W/m² até 2100. Essa escolha visa analisar um cenário de risco máximo, permitindo avaliar o comportamento do SEES sob condições de maior estresse ambiental, especialmente em termos de poluição do ar, RUV e T. A escolha do SSP5-8.5 não implica que outros cenários sejam irrelevantes, mas sim que eles podem ser objeto de estudos complementares.

Como forma de avaliar a robustez das projeções, foi realizada uma análise de desempenho dos ESMs em relação às variáveis utilizadas no cálculo do SEES. Com base nesse teste de sensibilidade, optou-se pela utilização do multimodelo *ensemble mean* (E)**,** definido como a média aritmética entre os dois modelos considerados na Tabela 2.1.

2.2.2. Validação das simulações do clima presente

Dados de reanálise, incluindo o *Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2* (MERRA-2; Bosilovich et al., 2017) e o *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Reanalysis, 5th Generation* (ERA5; Hersbach et al., 2020), foram empregados exclusivamente para validação, conforme amplamente adotado em estudos

climáticos (Faqeih et al., 2025; Ren et al., 2024). As variáveis e informações sobre reanálises utilizados nesse estudo são apresentados na Tabela 2.2.

Tabela 2. 2 - Variáveis e modelos climáticos utilizados neste estudo para validação do clima presente.

Reanálise	**Resolução horizontal e níveis verticais**	**Variáveis utilizadas (unidade)**
MERRA-2	0.5° x 0.625°; 72	AOD550 (ad) O3 (kg kg^{-1}) SO2 (mol mol^{-1}) DUSMASS (kg m^{-3}) BCSMASS (kg m^{-3}) OCSMASS (kg m^{-3}) SSSMASS (kg m^{-3}) SO4SMASS (kg m^{-3})
ERA5	0.25° x 0.25°; 143	t (K) r (%) CTO (DU)

Legenda: AOD550: profundidade óptica de aerossóis a 550 nm; O3: razão de mistura de ozônio; SO2: razão de mistura de dióxido de enxofre; DUSMASS: massa de poeira; BCSMASS: massa de carbono negro; OCSMASS: massa de carbono orgânico; SSSMASS: massa de sal marinho; SO4SMASS: massa de sulfato; t: temperatura do ar; r: umidade relativa; CTO: coluna total de ozônio;

Uma vez que o MERRA-2 disponibiliza os dados de razão de mistura de massa de O_3 (kg kg^{-1}), primeiramente foi necessário convertê-los para concentração de massa (kg m^{-3}) por meio da Equação 2.1:

$$\rho_x = \alpha_x \frac{p}{RT} \tag{2.1}$$

Em que ρ_x é a concentração (densidade) de uma espécie química, α_x é a razão de mistura de massa, T é a temperatura (25 °C), p é a pressão do ambiente (1 atm) e R é a constante específica dos gases (para ar seco = 287.058 $\frac{J}{Kg\,K}$).

Para a concentração de $PM_{2,5}$, foi considerada a equação fornecida por Bosilovich et al. (2016):

$$PM_{2,5}\ (kg\ m^{-3}) = BCSMASS + OCSMASS + SO4SMASS * (\frac{132.14}{96.06}) + DUSMASS25 + SSSMASS25 \quad (2.2)$$

Em que BCSMASS, OCSMASS, SO4SMASS, DUSMASS25 e SSSMASS25 são as concentrações de massa na superfície (densidade de massa colunar) de carbono negro, carbono orgânico, íon sulfato, poeira e sal marinho com diâmetros inferiores a 2,5 μm, respectivamente.

Como modelos capazes de representar adequadamente o clima passado tendem a apresentar maior robustez na projeção de cenários futuros, a validação do período histórico permite verificar a capacidade dos ESMs em reproduzir as condições observadas e fornece suporte à confiabilidade das projeções (Simpson et al., 2025). Assim, comparamos os dados do HP do CMIP6 com as bases de dados já utilizadas na literatura para estudos climáticos, como o ERA5 e MERRA-2. Dados mensais de UVI, H, O_3, SO_2 e $PM_{2.5}$ foram utilizados para avaliar o desempenho das simulações no período entre 1980-2014.

Os dados dos ESMs do CMIP6, bem como das reanálises ERA5 e MERRA-2, foram interpolados para uma resolução horizontal comum de 1,0° × 1,0° (latitude/longitude). Em seguida, foi calculada a média do conjunto multimodelo (*ensemble mean*, E) exclusivamente a partir dos ESMs do CMIP6, utilizando a média aritmética simples dos modelos considerados. A avaliação e validação dos ESMs foi realizada por meio das estatísticas: raiz do quadrado médio do erro (RQME), correlação de Pearson (r) e erro médio (BIAS):

$$RQME = \left[\frac{\sum(E_i - O_i)^2}{nd}\right]^{0,5} \quad (2.3)$$

$$r = \frac{\sum(E_i - \bar{E})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{(\sum(E_i - \bar{E})^2 - \sum(O_i - \bar{O})^2)}} \quad (2.4)$$

$$BIAS = \frac{\sum(E_i - O_i)}{nd} \quad (2.5)$$

Em que E_i são dados do CMIP6 no período de 1980-2014; O_i são dados das reanálises (ERA5 e MERRA-2) no mesmo período e nd o número de dados.

Como as variáveis de estudo apresentam diferentes unidades e amplitudes, as métricas acima foram normalizadas por variável para permitir a comparação entre modelos. Assim, todas as métricas foram normalizadas em um intervalo entre 0 (pior desempenho) e 1 (melhor desempenho). Para o RQME e BIAS, o menor valor indica melhor desempenho.

Para cada modelo (m) e variável (v), calculou-se um índice agregado de desempenho ($I_{m,v}$) através da média aritmética simples das três métricas (BIAS, RQME e r) normalizados. O desempenho global de cada modelo foi então avaliado por meio da média dos $I_{m,v}$, do desvio padrão e do coeficiente de variação (CV).

Para integrar desempenho médio e estabilidade, foi definido um score de utilidade:

$$U_m = \mu_m - k\sigma_m \quad (2.6)$$

adotando-se $k = 0{,}5$, considerando aversão moderada à inconsistência (Koo e Li, 2016), adequada à variabilidade inerente aos dados climáticos.

Adicionalmente, o desempenho dos modelos e variáveis foi avaliado por meio do teste não paramétrico de Friedman (Sheldon, 1996), considerando as variáveis como blocos e os modelos como tratamentos.

2.2.3. Avaliação das mudanças projetadas

A significância estatística das diferenças entre os períodos passado e futuros foi avaliada por meio do teste não paramétrico de Mann-Whitney (MacFarland e Yates, 2016), escolhido por sua robustez frente à não normalidade e à possível heterogeneidade de variâncias nas séries climáticas. Para avaliar a magnitude do efeito das diferenças entre o HP e a FP e FD, utilizou-se o Cohen's d (Cohen, 1992), que quantifica a magnitude da diferença independentemente do tamanho da amostra.

O coeficiente d foi calculado com base nas séries temporais de médias globais ponderadas do SEES, utilizando o desvio padrão combinado das duas amostras comparadas. Essa abordagem permite avaliar a relevância prática das mudanças projetadas, independentemente do tamanho amostral e da significância estatística. A magnitude da variação foi interpretada conforme os limiares clássicos: pequeno ($d \approx 0{,}2$), moderado ($d \approx 0{,}5$) e grande ($d \geq 0{,}8$), possibilitando distinguir mudanças sutis de intensificações substanciais do SEES ao longo do século.

Para a avaliação dos padrões espaciais, foram definidas bandas latitudinais em ambos os hemisférios, classificadas em: trópicos (0°–30°), médias latitudes (30°–60°) e altas latitudes (60°–90°), considerando separadamente HN e HS. A variação relativa (VR) para quantificar as mudanças projetadas é apresentada na Equação 2.9. Foram comparadas as distribuições de VR nos cenários FP e FD por meio de métricas descritivas (média, P95 e desvio padrão) e testes

estatísticos (teste t (Snedecor and Cochran, 1989) e Kolmogorov–Smirnov (Wilcox, 2005)), visando quantificar diferenças médias, extremas e de distribuição entre os cenários.

$$\mathrm{VR} = \left(\frac{\mathrm{SEES}_F - \mathrm{SEES}_\mathrm{H}}{\mathrm{SEES}_\mathrm{H}}\right)*100 \qquad (2.7)$$

Em que os subscritos F e H indicam os valores de SEES no futuro e no período de referência (historical), respectivamente.

O SEES também foi calculado localmente para grandes centros urbanos em latitudes tropicais, subtropicais e temperadas, contemplando diferentes climas e localizações geográficas (Tabela 2.3). Os resultados, obtidos ano a ano para as datas dos solstícios e equinócios até o final do século, permitem avaliar a variabilidade do SEES pontualmente sob distintos regimes climáticos.

Tabela 2. 3 - Coordenadas geográficas das cidades do estudo.

Cidade	País	Latitude (°)	Longitude (°)
Paris	França	48.86 N	2.35 E
Nova Iorque	Estados Unidos	40.71 N	74.01 W
Shanghai	China	31.23 N	121.47 E
Delhi	Índia	28.61 N	77.21 E
Lagos	Nigéria	6.52 N	3.38 E
Manaus	Brasil	3.10 S	60.02 W
São Paulo	Brasil	23.55 S	46.63 W
Joanesburgo	África do Sul	26.20 S	28.04 E
Sydney	Austrália	33.87° S	151.21° E

2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.3.1. Avaliação de desempenho dos ESM's

As comparações foram realizadas para as quatro variáveis utilizadas diretamente no cálculo do SEES ($PM_{2.5}$, O_3, SO_2 e Humidex), bem como para as duas variáveis de entrada para o cálculo do UVI (AOD550 e CTO). Os resultados normalizados calculados a partir das médias globais de cada variável estão apresentados na Tabela 2.4.

Tabela 2. 4 - Resultado das métricas calculadas para avaliação de desempenho dos modelos.

Variável	BIAS			RQME			Correlação r		
	E	M	G	E	M	G	E	M	G
AOD550 (ad)	0.0	-0.0	0.0	0.69	0.70	1.00	0.78	0.73	0.77
CTO (DU)	16.4	39.9	-7.0	0.41	1.00	0.18	0.98	0.96	0.98
O_3 (ppm)	0	-0.0	0.0	0.70	0.61	1.00	0.81	0.68	0.92
$PM_{2.5}$ (μg/m³)	-0.3	1.3	-1.9	0.32	0.87	1.00	0.74	0.71	0.66
Humidex	-2.8	-2.3	-3.2	0.86	0.74	1.00	1.00	1.00	1.00
SO_2 (ppb)	0.06	0.12	0.01	0.54	1.00	0.14	0.98	0.98	0.98

*E: ensemble mean; M: MRI-ESM2-0; G: GFDL-ESM4. Melhor métrica, pior métrica.

O multimodelo E apresentou desempenho superior ou equivalente aos modelos individuais, destacando-se especialmente no RMSE normalizado do $PM_{2.5}$ (0.32) e na correlação da AOD550 (r = 0.78). Para O_3, os três modelos apresentaram viés nulo, sendo que o modelo M obteve o menor RMSE (0.61), enquanto o modelo G apresentou a maior correlação (r = 0.92). Para CTO e SO_2, o modelo G apresentou os melhores valores combinados de viés e RMSE, enquanto para Humidex o melhor desempenho em termos de RMSE foi associado ao modelo M. Entretanto, mesmo quando não apresentou o melhor desempenho absoluto, o E não foi o pior modelo em nenhuma variável ou métrica analisada.

A aplicação da normalização e agregação gerou os índices apresentados na Tabela 2.5, permitindo a síntese do desempenho dos modelos composto por métricas de erro (BIAS e RMSE), associação (correlação) e estabilidade intervariável. O E apresentou o maior valor de desempenho médio global (μ = 0,789), seguido pelo GFDL-ESM4 (μ = 0,711) e pelo MRI-ESM2-0 (μ = 0,433). Também, o multimodelo E apresentou menor variabilidade em relação as variáveis (σ = 0,121; CV = 0,153), o que indica maior estabilidade entre as diversas variáveis utilizadas. O score de utilidade confirmou a superioridade do E (U = 0,728), assim como o teste de Friedman, que também indicou melhor rank médio em comparação aos modelos individuais.

Tabela 2. 5 - Avaliação integrada do desempenho dos ESMs baseada na normalização das métricas (BIAS, RQME e r), agregação multicritério e análise de consistência.

	Variável	**E**	**M**	**G**
Score integrado	AOD550 (ad)	1.000	0.656	0.600
	CTO (DU)	0.740	0.000	1.000
	O_3 (ppm)	0.770	0.667	0.667
	$PM_{2.5}$ (μg/m³)	0.833	0.272	0.333
	Humidex	0.698	0.667	0.667

	SO_2 (ppb)	0.693	0.333	1.000
	Média (μ)	0.789	0.433	0.711
	Desvio padrão (σ)	0.121	0.271	0.242
	Coeficiente de Variação (CV)	0.153	0.626	0.340
	Score de utilidade	0.728	0.297	0.590
Teste de Friedman	AOD550 (ad)	1	2	3
	CTO (DU)	2	3	1
	O_3 (ppm)	1	2.5	2.5
	$PM_{2.5}$ (μg/m³)	1	2	3
	Humidex	1	2.5	2.5
	SO_2 (ppb)	2	3	1

*E: ensemble mean; M: MRI-ESM2-0; G: GFDL-ESM4. Melhor métrica, pior métrica.

O uso da média global contribui para a redução de ruídos e a suavização de extremos associados às diferenças estruturais entre os modelos, o que favorece uma avaliação integrada do desempenho médio. Entretanto, essa abordagem implica uma limitação importante: a agregação espacial pode atenuar padrões regionais relevantes, especialmente em variáveis com forte heterogeneidade espacial, como poluentes atmosféricos, ou com gradientes bem definidos, como o CTO. Nesse sentido, a métrica global não deve ser interpretada como substituta da análise espacial, mas como uma medida complementar de desempenho agregado.

Ainda assim, o objetivo da comparação aqui apresentada não é capturar padrões locais, mas avaliar a consistência estatística e a robustez global dos modelos em diferentes variáveis do sistema SEES. As variações espaciais do BIAS apresentadas no Apêndice complementam essa análise ao evidenciar que, embora existam variações espaciais locais esperadas devido às características de cada variável, o comportamento do E mantém-se mais equilibrado. Dessa forma, a combinação entre análise global e espacial sustenta a adoção do E como estimativa mais representativa para o cálculo do SEES, com maior robustez estatística e consistência física.

2.3.2. Projeções futuras e análises

A Figura 2.1 apresenta as projeções do SEES para os solstícios de junho e dezembro nos três períodos de análise: HP, FP e FD. O padrão de distribuição global do SEES é latitudinal, semelhante ao do UVI, indicando a predominância da radiação solar como fator de risco à saúde da pele. No entanto, o SEES se destaca pelo aumento da abrangência de áreas de risco "Muito Alto" ou "Extremo" em duas situações principais: em regiões de altas temperaturas, como o nordeste da África, deserto do Chaco Paraguaio e o norte da Austrália no verão austral; ou em locais com picos de poluição do ar, em grandes áreas da China e Índia durante o verão

setentrional.

Na Figura 2.1, além da intensificação dos SEES ao longo do século, verifica-se o aumento do número de classes de maior risco em regiões entre 30° e 45°, principalmente durante o verão. Esse padrão é observado no sul da Europa e no leste da China, onde áreas anteriormente classificadas como risco "Moderado" ou "Preoupante" passam a "Alto" ou "Muito Alto", sugerindo uma alteração no regime de risco ambiental ao longo do século, associada à intensificação combinada de RUV, estresse térmico e poluição atmosférica (IPCC, 2022; Yamamoto et al., 2024 a,b). De maneira geral, as projeções indicam aumento progressivo do SEES ao longo do século, com expansão das áreas classificadas nas categorias de maior risco ("Alto", "Muito Alto" e "Extremo"), especialmente no FD.

Fatores geográficos e fenômenos atmosféricos também colaboram para a intensificação do SEES. Regiões tropicais e subtropicais possuem originalmente condições de temperaturas elevadas e alta umidade (Raymond et al., 2020), que devem se agravar sob o aquecimento global (Jackson et al., 2025). Por exemplo, a Amazônia e Austrália deverão sofrer aumento na temperatura e mudanças no ciclo de chuvas (Dey et al., 2019; Marengo et al., 2024). Essas mudanças do clima favorecerão o acúmulo de poluentes na atmosfera e intensificarão o risco de seca e estresse térmico (Espinoza et al., 2024).

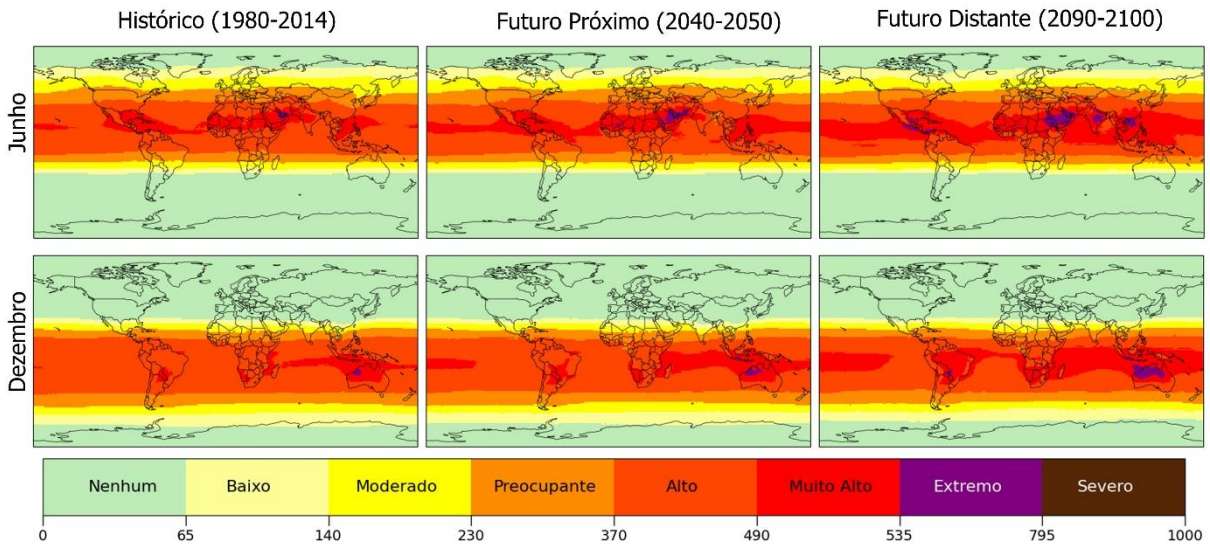


Figura 2.1 - *Skin Environmental Exposure Score* (SEES) médio nos meses de junho e dezembro nos períodos histórico (1980 - 2014), futuro próximo (2040 - 2050) e distante (2090 - 2100) do século XXI sob o cenário SSP5-8.5. Todos os painéis foram elaborados considerando o *ensemble mean* dos Modelos do Sistema Terrestre.

Para aprofundar essa discussão, a Figura 2.2 mostra a distribuição espacial das diferenças relativas entre os períodos futuros e HP. As áreas em altas latitudes durante os invernos de cada hemisfério foram deliberadamente deixadas sem atribuição (nenhum valor mostrado) porque os valores SEES correspondentes se aproximam de zero, de modo que as diferenças relativas se tornariam extremamente grandes, podendo distorcer a percepção do leitor. O risco, representado pelo aumento do SEES ao longo do século, mostra-se marcante em determinadas áreas na região tropical e em latitudes médias do HN, com implicações importantes para o planejamento de políticas de mitigação e adaptação em relação à exposição ambiental crônica da população.

As maiores anomalias positivas (VR > 15% no FD), persistentes no verão e no inverno, ocorrem no norte da Índia e leste da Ásia, incluindo Coréia, Japão e grandes áreas da China. Nessas regiões, o aumento do SEES está associado à intensificação das ondas de calor e à variabilidade das monções, combinadas a elevadas concentrações de poluentes atmosféricos (Fang et al., 2025; Gao et al., 2025; Kumar et al., 2025). Essas regiões incluem áreas densamente povoadas e particularmente vulneráveis aos impactos climáticos, o que pode ampliar os efeitos das mudanças ambientais sobre a saúde humana (Bathiany et al., 2018).

Durante o verão, a relação entre a variabilidade da monção asiática e o aumento projetado do SEES pode ocorrer por meio de mecanismos complementares. Alterações na circulação monçônica podem modificar a distribuição espacial e temporal da precipitação, afetando, consequentemente, a eficiência de remoção úmida (wet scavenging) dos aerossóis. Períodos mais prolongados de precipitação reduzida ou de maior intervalo entre eventos de chuva podem favorecer a acumulação de partículas atmosféricas, contribuindo para o aumento da exposição a $PM_{2.5}$. Esse mecanismo, entretanto, deve ser interpretado em conjunto com a maior variabilidade espacial e temporal da precipitação, uma vez que o enfraquecimento da circulação monçônica não implica necessariamente redução uniforme da precipitação regional (Bollasina et al., 2014; Singh et al., 2019).

Para o O_3, a relação é mais diretamente associada às condições meteorológicas e fotoquímicas. O aumento das temperaturas, a maior frequência de condições atmosféricas estáveis e alterações na circulação podem favorecer a produção e a persistência do ozônio troposférico, contribuindo para a ocorrência de extremos compostos de calor e poluição. Projeções recentes indicam, inclusive, aumento da ocorrência conjunta de extremos de calor,

$PM_{2.5}$ e O_3 em regiões da China e da Índia sob cenários futuros de mudança climática (Gao et al., 2025).

Um segundo mecanismo envolve a própria interação entre aerossóis e circulação monçônica. Alterações na carga de aerossóis sobre o subcontinente indiano podem modificar o balanço radiativo atmosférico e superficial por meio de efeitos diretos e indiretos, alterando a estabilidade atmosférica, a circulação regional e a distribuição da precipitação. Estudos de modelagem demonstram que os aerossóis antropogênicos podem contribuir significativamente para alterações na circulação e na precipitação associadas à monção de verão do Sul da Ásia (Bollasina et al., 2014). Dessa forma, pode-se estabelecer uma retroalimentação entre poluição atmosférica, circulação monçônica e regime de precipitação, que se soma ao aumento independente do estresse térmico decorrente do aquecimento climático.

No inverno, contudo, a persistência das anomalias positivas do SEES não deve ser atribuída diretamente à variabilidade da monção de verão. Nessa estação, mecanismos associados à maior estabilidade atmosférica, redução da altura da camada limite, menor dispersão de poluentes, transporte regional e condições meteorológicas favoráveis ao acúmulo de $PM_{2.5}$ podem assumir maior importância. Assim, a persistência sazonal das anomalias do SEES provavelmente resulta da atuação de mecanismos distintos, porém complementares, ao longo do ciclo anual.

Em contraste, anomalias negativas do SEES são observadas no verão em altas latitudes em ambos os hemisférios, estendendo-se às médias latitudes do HS. Essa diminuição do SEES está associada às projeções de recuperação da camada de O3 estratosférico, que reduz a incidência de RUV na superfície (Yamamoto et al., 2024a). A diminuição do SEES em altas latitudes indica um contraste marcante com as regiões tropicais e de médias latitudes, onde o aumento da temperatura e a maior frequência de eventos extremos tendem a amplificar a carga térmica (Kjellstrom et al., 2018) e a exposição a poluentes (Alisoltani et al., 2024).

A intensificação do SEES é espacialmente heterogênea e mais significativa em regiões particularmente quentes e poluídas do planeta. De modo geral, essas anomalias positivas sugerem potencial ainda maior de amplificação do risco ambiental, com implicações mais

expressivas para a saúde e a vulnerabilidade populacional nas regiões onde os níveis do SEES já são atualmente elevados (Ebi e Hess, 2020).

Esse padrão pode ser particularmente relevante em contextos de desigualdade socioambiental, nos quais limitações de infraestrutura, acesso à informação e serviços de saúde tendem a ampliar a exposição e reduzir a capacidade adaptativa (IPCC, 2022). Nesse sentido, os resultados deste estudo reforçam a importância de estratégias regionais de mitigação e adaptação que considerem a distribuição espacial heterogênea do risco e a interação entre múltiplos fatores ambientais (Parry et al., 2019).

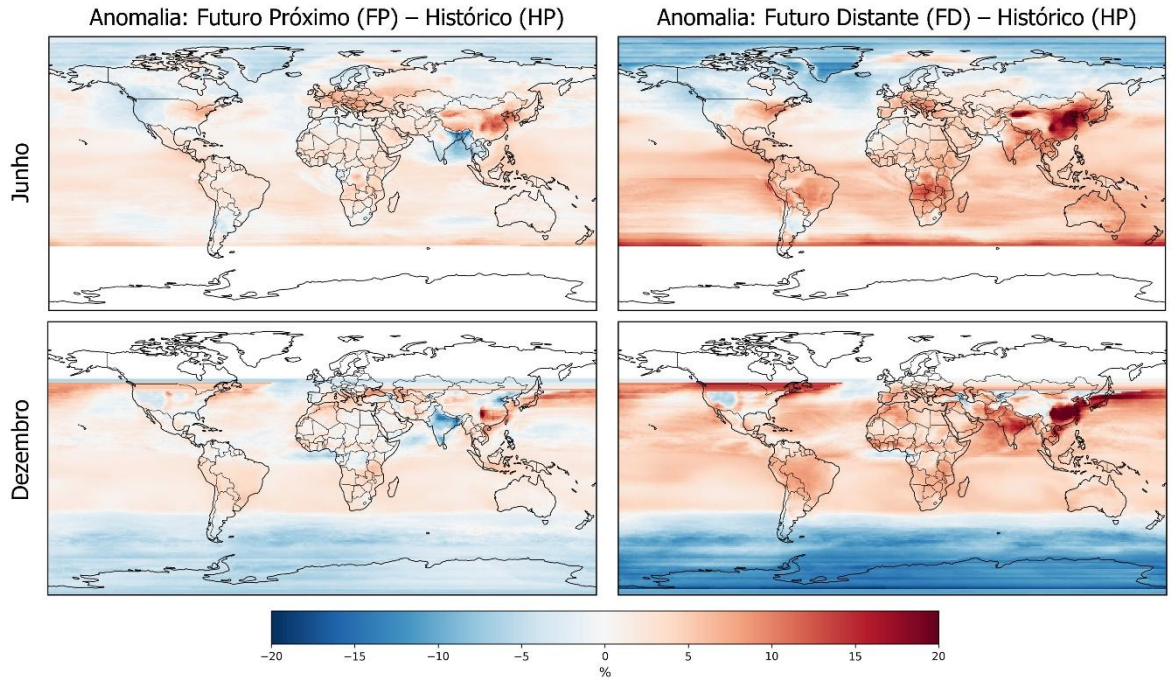


Figura 2.2 - Análise de variação relativa (VR) projetada no *Skin Environmental Exposure Score* (SEES) médio anual nos períodos futuro próximo (2040 - 2050) e distante (2090 - 2100) do século XXI sob o cenário SSP5-8.5. Todos os painéis foram elaborados considerando o *ensemble mean* dos Modelos do Sistema Terrestre.

Globalmente, o SEES deve aumentar, em média, 4,2% entre HP e FD ($\Delta SEES = 11$, $p < 0{,}001$; $d = 5{,}6$) em junho; e 1,7% em dezembro, embora ainda estatisticamente significativo e associado a grande magnitude de efeito ($\Delta SEES = 5$, $p < 0{,}001$; $d = 1{,}7$). No entanto, apesar da média global indicar essa tendência positiva, a variação do SEES ao longo deste século é marcada por forte sazonalidade hemisférica, conforme mostra a Tabela 2.5.

Embora as diferenças observadas apresentem elevada significância estatística ($p < 0{,}001$) e grande magnitude de efeito, conforme o d de Cohen, sua relevância prática torna-se mais evidente quando os resultados são convertidos para a escala absoluta do SEES (0–1000) e

comparados às amplitudes das categorias de risco apresentadas na Tabela 1.8. Nesse sentido, o aumento médio de 4,2% observado em junho corresponde a aproximadamente 11 pontos no escore, enquanto a variação de 1,7% registrada em dezembro representa cerca de 5 pontos. Esses incrementos são relativamente pequenos quando comparados à amplitude das categorias de risco, que varia aproximadamente entre 65 e 140 pontos nas faixas intermediárias. Portanto, considerando apenas a média global, essas alterações não seriam suficientes para produzir uma mudança generalizada de categoria de risco.

A interpretação, contudo, não deve se restringir ao comportamento da média. Conforme indicado pela distribuição apresentada na Figura 2.3, a principal implicação desses aumentos está relacionada à alteração da distribuição dos valores do SEES, especialmente ao deslocamento da cauda superior, evidenciado pelo aumento do percentil 95 (p95), e à ampliação do intervalo interquartil. Esse comportamento indica que o efeito não ocorre de maneira uniforme sobre toda a superfície analisada. Em particular, as células de grade que já apresentam valores próximos aos limites superiores de suas respectivas categorias de risco tendem a ser mais sensíveis a pequenos incrementos no SEES, podendo ultrapassar o limiar da categoria subsequente.

Dessa forma, embora as variações médias observadas sejam relativamente modestas em termos absolutos, seus efeitos podem assumir maior relevância em regiões que já apresentam níveis elevados de exposição, especialmente nos trópicos e subtrópicos densamente povoados. O impacto prático dos resultados, portanto, está menos associado a uma mudança generalizada da classificação de risco e mais ao aumento da probabilidade de transposição de limiares críticos em áreas que já se encontram próximas às categorias superiores de risco.

Tabela 2.5 - Variações regionais do SEES (%) entre os períodos histórico (HP), futuro próximo (FP) e futuro distante (FD) nos solstícios de junho e dezembro, com significância estatística do teste KS.

	Junho				Dezembro			
	HP-FP		HP-FD		HP-FP		HP-FD	
Região	Variação % (SEES units)	p	Variação % (SEES units)	p	Variação % (SEES units)	p	Variação % (SEES units)	p
Altas latitudes N	-1,7	ns	-4,6	***	-	-	-	-
Médias latitudes N	1,0	*	2,0	***	2,0	**	5,2	***
Tropical N	1,5	***	4,2	***	0,6	ns	4,9	***
Tropical S	1,9	***	5,7	***	2,0	***	4,3	***

Médias latitudes S	1,3	**	4,4	***	-1,7	**	-3,1	***
Altas latitudes S	-	-	-	-	-4,5	**	-11,8	***

Legenda: Significância do teste KS para a diferença entre a distribuição do SEES no período histórico e no cenário futuro: ns – não significativo; * ($p < 0,05$); ** ($p < 0,01$); *** ($p < 0,001$).

A Tabela 2.5 mostra um padrão de aumento consistente do SEES na maioria dos períodos e faixas latitudinais analisadas. As regiões tropicais N e S apresentam aumentos estatisticamente muito significativos ($p < 0,001$) até o final do século (FD), variando, no mês de junho, de 4% na faixa tropical norte a quase 6% na parte sul . Essa tendência positiva também é observada em dezembro, mas com comportamento contrário entre os trópicos N e S. Isto é, durante o verão austral, a região tropical S passa a ter aumento médio menor em relação à região tropical N (4,3% contra quase 5,0%). Outra observação importante é a acentuação do aumento do SEES na segunda metade do século (FD) em relação ao período FP, principalmente durante o inverno. Esses resultados indicam um potencial aumento do risco durante a estação mais fria do ano equivocadamente considerada “menos danosa” à saúde da pele. Possivelmente, essa variação mais acentuada do SEES no inverno está relacionada ao aumento médio global da temperatura global, principalmente sobre as mínimas diárias (Zhao et al., 2018; Kuang et al., 2019).

Essa variação positiva do SEES ao longo do tempo tende a ser mais moderada, porém mais variável, com o aumento da latitude. Enquanto médias latitudes N apresentam aumentos consistentes do SEES ao longo do século, variando de 2,0% no verão a mais de 5,0% no inverno, a região de médias latitudes S apresentam tendências opostas. Durante o inverno austral, a tendência é semelhante a do HN com aumento do SEES próximo de 4,5%. No entanto, durante o verão, as projeções mostram tendências negativas e, portanto, de diminuição do SEES no decorrer deste século, chegando a pouco mais de 3% de atenuação em FD. Essa tendência de diminuição do SEES também é projetada para os verões nas altas latitudes em ambos os hemisférios, podendo ultrapassar os -11% no HS. Tal atenuação está relacionada à recuperação da camada de O_3 e ao aumento do conteúdo desse gás em latitudes mais elevadas, reduzindo a disponibilidade de RUV em superfície (Bais et al., 2019; Corrêa et al. 2019; Yamamoto et al., 2024).

Esse conjunto de resultados indica que as projeções futuras do SEES apresentam forte modulação sazonal e latitudinal. Em resumo, as regiões tropicais concentram os aumentos mais persistentes e intensos em ambos os solstícios, enquanto as altas latitudes apresentam reduções

predominantes durante o verão local. Os padrões observados são compatíveis com as mudanças combinadas na RUV, no estresse térmico e na concentração de poluentes atmosféricos projetadas pelos modelos climáticos para o século XXI (IPCC, 2022; Yamamoto et al., 2024).

A Figura 2.3 complementa a análise sobre a variabilidade espaço-temporal do SEES. Além da predominância de variações positivas na maioria das regiões e períodos analisados, observa-se a intensificação do sinal e o aumento da variabilidade interquartil na transição do meio (FP) para o final do século (FD). De modo geral, comparativamente ao FP, o boxplots dos FD revelam não apenas um deslocamento ascendente da tendência central, representado pelos aumentos das medianas ao longo do tempo, mas também uma expansão da variabilidade dos dados, evidenciada pelo maior intervalo interquartil pela amplitude total mais ampla dos whiskers, sugerindo um aumento da dispersão e da heterogeneidade do SEES ao final do século. Esse comportamento indica que as mudanças projetadas não se limitam apenas ao aumento das condições médias sazonais, mas envolvem também maior dispersão dos valores e intensificação dos extremos, especialmente nas regiões tropicais e nas latitudes médias (Fischer et al., 2021).

O aumento simultâneo da variabilidade indica a maior ocorrência dos extremos de risco ambiental. Em grande parte do HN, principalmente no Leste da Ásia, esse comportamento pode estar relacionado à maior variabilidade na concentração de aerossóis (Xu et al., 2018), episódios de pico de poluição atmosférica (Xie et al., 2022; Chang et al., 2025), na ocorrência de ondas de calor (Dahl et al., 2019; Zeppetello et al., 2022) e na persistência de elevados níveis de RUV (Zhang et al., 2021), evidenciando a atuação combinada de componentes radiativos e termodinâmicos nas regiões tropicais.

Por outro lado, as diminuições do SEES observadas nas latitudes médias do HS também estão relacionadas ao aumento da dispersão espacial dos valores de SEES nessas regiões. Essa tendência está associada principalmente à recuperação da camada de O_3 estratosférico (Bais et al., 2019; Yamamoto et al., 2024), bem como ao predomínio de áreas oceânicas no HS, que tendem a apresentar menor aquecimento e menor variabilidade climática em comparação às regiões continentais (Sutton et al., 2007; IPCC, 2022).

Em resumo, a ampliação da diferença entre a média e a mediana, associada ao aumento do p95, confirma a maior assimetria da distribuição do SEES ao longo do século, com intensificação da cauda superior e maior frequência de valores extremos. Em outras palavras, mesmo em regiões onde a média do SEES diminui, episódios de risco extremo poderão se tornar

mais frequentes e intensos no final do século. Esse comportamento indica o aumento da variabilidade espacial e temporal das condições ambientais projetadas, sugerindo que as mudanças futuras do SEES não se restringem a alterações das condições médias, mas envolvem também maior dispersão dos valores e intensificação dos extremos.

Para os tomadores de decisão, esses resultados reforçam a necessidade de estratégias de adaptação voltadas não apenas às mudanças médias do clima, mas também ao aumento da frequência e intensidade de eventos ambientais extremos. No contexto da saúde pública, isso implica maior probabilidade de ocorrência de episódios pontuais potencialmente mais prejudiciais à saúde da pele, especialmente em regiões já vulneráveis às condições climáticas e atmosféricas extremas. Apesar das reduções médias projetadas em algumas áreas extratropicais, os extremos positivos do SEES continuam aumentando na maior parte do planeta, principalmente nos trópicos e nas médias latitudes do HN, evidenciando que o agravamento do risco ambiental cutâneo tende a ocorrer de forma heterogênea, porém cada vez mais intensa ao longo do século XXI.

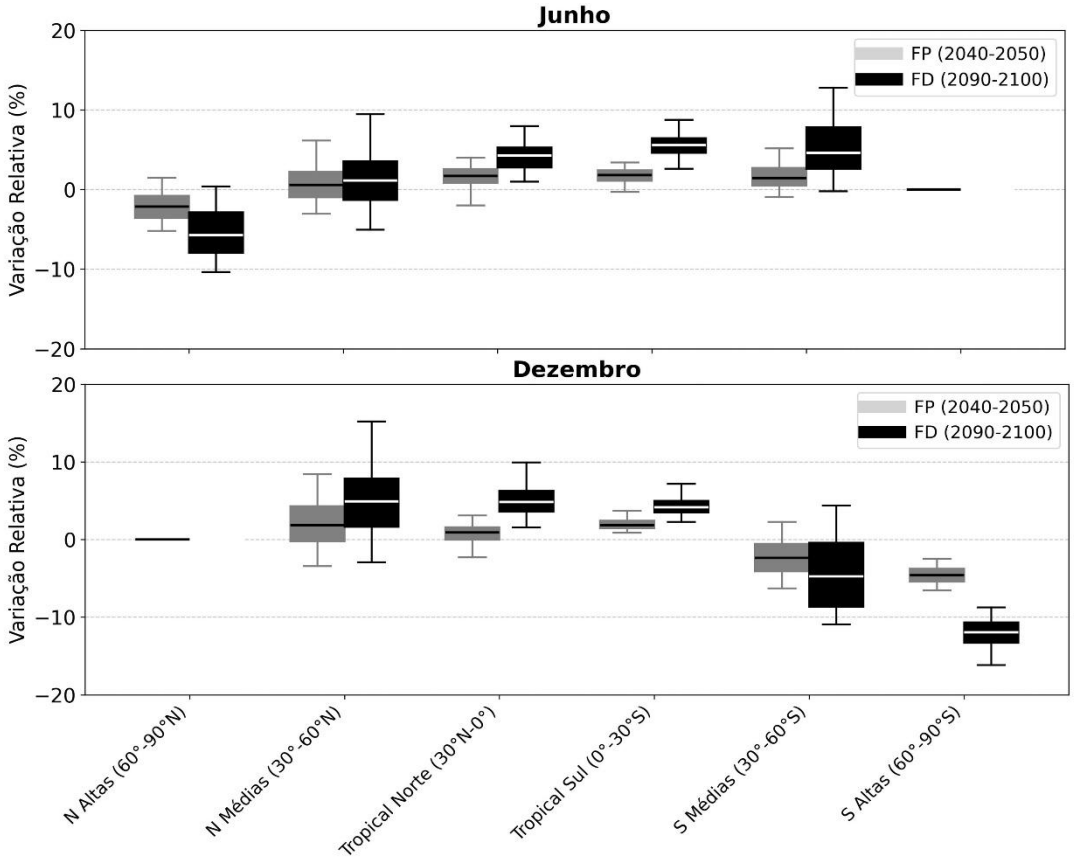


Figura 2.3 - Distribuição da variação relativa (VR) do SEES por bandas latitudinais para os meses de junho e dezembro, comparando os períodos 2040–2050 (cinza claro) e 2090–2100 (cinza escuro) em relação ao período histórico. As caixas indicam o intervalo interquartil (q1–

q3), a linha central representa a mediana (p50) e as linhas verticais correspondem ao p5 e p95 do SEES.

2.3.3. SEES ao longo do século em algumas das maiores cidades do mundo

A Figura 2.4 mostra a variabilidade do SEES em diferentes cidades ao longo do século. Em cidades de médias latitudes do HN, como Paris, França e Nova Iorque, USA, observa-se o efeito marcante da sazonalidade, com SEES baixos durante a primavera (março) e o inverno (dezembro), tanto no HP quanto nas projeções. Entretanto, há incremento significativo do SEES no decorrer do século durante o verão (junho) ($p << 0,001$). Em Nova Iorque, o SEES apresenta historicamente níveis preocupantes e tendência de aumento de +0,5 SEES/ano, aproximando-se do limite superior dessa categoria de risco. Em Paris, o *score* evolui de um risco historicamente moderado para níveis preocupantes até o final do século XXI, refletindo a maior sensibilidade dessas regiões a extremos de temperatura (Brown, 2020; Ortiz et al., 2019).

Em regiões influenciadas por regimes de monção, como Xangai, China, e Délhi, Índia, o SEES é fortemente modulado por verões quentes e úmidos e invernos relativamente mais frios, e elevada concentração de poluentes. Em todos os períodos, observa-se crescimento acentuado do SEES até o final do século, atingindo níveis preocupantes ou altos inclusive no inverno (dezembro). As tendências mais expressivas ocorrem em Xangai (+1,1 SEES/ano no verão, $p << 0,001$) e em Délhi (+1,8 SEES/ano no outono, $p << 0,001$). Esse incremento está associado, sobretudo, à maior disponibilidade de RUV e aumento do estresse térmico ao longo do século, expandindo os riscos dermatológicos para além dos meses de verão (Ebi et al., 2021; Shukla e Attaka, 2023).

Em regiões tropicais, como Manaus, Brasil e Lagos, Nigéria, o SEES apresenta níveis naturalmente elevados desde o período histórico, com baixa variabilidade sazonal, sustentado por altos níveis de RUV e estresse térmico. Em Manaus, o risco é intensificado por efeitos locais, como a ilha de calor urbana em comparação ao entorno florestal (Souza et al., 2016; Santos et al., 2024). Além disso, a elevação do SEES, especialmente nas estações de transição, reflete o aquecimento regional, a redução da pluviosidade e o prolongamento da estação seca na Amazônia (Reboita et al., 2021; Bottino et al., 2024). Em Lagos, o aquecimento associado à elevada umidade também pode influenciar a concentração de material particulado por meio de processos de convecção (Emekwuru e Ejohwomu, 2023).

De forma geral, estudos apontam aumento das temperaturas, maior frequência de eventos extremos de calor (Obe et al., 2023; Moraes et al., 2024; Corrêa, 2025; Kavathekar et al., 2024) e elevada incidência de radiação solar (Israel et al., 2020) nessas regiões, contribuindo para a manutenção do SEES em categorias predominantemente altas ao longo do ano.

Considerando que a percepção de risco é um fator determinante para mudanças comportamentais (Sheeran et al., 2014), a exposição persistente a altos níveis de radiação solar e a outros estressores pode dificultar processos de adaptação, dado o caráter recorrente das condições ambientais adversas (Thompson e Spencer, 1996; Di Giulio et al., 2015). Em contextos de desigualdade socioambiental, esse cenário pode ser ainda mais crítico, uma vez que limitações no acesso à infraestrutura, informação e medidas de fotoproteção tendem a ampliar a exposição e reduzir a capacidade adaptativa (Menezes-Júnior, 2025).

Em cidades do HS, como São Paulo, Brasil, Joanesburgo, África do Sul, e Sydney, Austrália, observa-se maiores SEES no verão, associados aos máximos de radiação solar e estresse térmico. Ainda assim, algumas dessas cidades apresentam níveis moderados a altos mesmo no inverno. Em São Paulo, destaca-se o aumento na frequência de eventos extremos de O_3 em superfície, frequentemente associados a altas temperaturas e ondas de calor (Carvalho et al., 2025). Esse comportamento contribui para a elevação do SEES tanto no verão quanto no inverno. Em Sydney, por outro lado, os eventos de poluição por O_3 superficial são menos frequentes, sendo o SEES predominantemente modulado pela variabilidade da radiação solar e da temperatura (Bubathi et al., 2023). Em Joanesburgo, a tendência positiva observada está associada ao aumento do estresse térmico e da umidade, impactando diretamente o SEES. Diversos estudos indicam aumento da vulnerabilidade a impactos relacionados ao calor em diversas cidades africanas (Fotso-Nguemo et al., 2022; Pasquini et al., 2020).

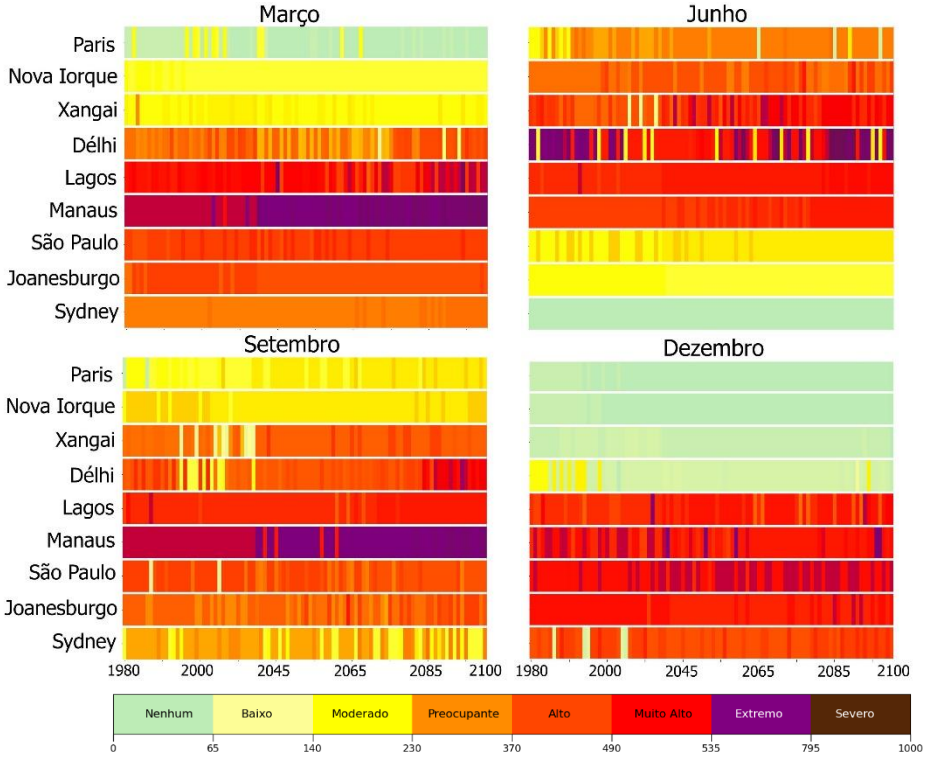


Figura 2.4 - Tendência sazonal do Skin Environmental Exposure Score (SEES) para as cidades, ordenadas a partir da latitude: Paris, Nova Iorque, Xangai, Délhi, Lagos, Manaus, São Paulo, Joanesburgo e Sydney nos meses de março, junho, setembro e dezembro. As faixas coloridas indicam as classes de risco do SEES.

As tendências temporais do SEES estão fortemente condicionadas pela latitude e pelos regimes climáticos locais. Em altas e médias latitudes, observa-se uma variabilidade do risco predominantemente sazonal, com a intensificação mais restrita aos meses de verão. Na faixa subtropical, principalmente em cidades do HS, cuja sazonalidade é menos marcante, o risco à saúde da pele não se restringe apenas aos máximos SEES observados no verão, mas com valores bastante expressivos em outras estações ano. Em regiões tropicais e influenciadas por monções destacam-se níveis elevados e persistentes de SEES ao longo de todo o ano, caracterizando um regime de risco contínuo.

Não podemos deixar de destacar que, assim como observado com o UVI, os níveis mais elevados de SEES coincidem com o período de maior incidência de RUV, em torno do meio-dia solar. No entanto, os efeitos combinados com o calor e a poluição reforçam a recomendação de risco ambiental persistente mesmo em outros horários. Em ambientes urbanos, essa condição reflete a atuação combinada desses múltiplos fatores que atuam de forma sinérgica sobre a saúde da pele (Sun et al., 2019; Le, 2020). Essa sobreposição pode comprometer os mecanismos de defesa cutânea e aumentar a suscetibilidade a efeitos adversos (Belzer e Parker, 2023).

Embora a análise esteja centrada em recortes temporais específicos, a consistência dos

valores elevados reforça a relevância da exposição ambiental combinada como fator de risco, especialmente em grandes centros urbanos. Nesse contexto, os resultados destacam a importância de estratégias de adaptação e mitigação que considerem a complexidade dos fatores ambientais envolvidos, contribuindo para o desenvolvimento de políticas públicas mais eficazes na redução dos impactos à saúde (Bi et al., 2020; Zhang et al., 2025).

2.4. CONCLUSÕES

A fotoproteção, terminologia amplamente utilizada para a proteção da saúde da pele, limita-se somente à exposição solar. No entanto, os resultados deste estudo mostram que o efeito sinérgico do estresse térmico e dos poluentes é relevante e somam-se aos efeitos da exposição ao Sol. Este argumento é sustentado pelo aumento observado do SEES, escore proposto para representar tal sinergia, ao longo do século XXI, especialmente sob o cenário de aquecimento global ocasionado por altas emissões de poluentes (SSP5-8.5).

Nosso estudo também mostrou que o aumento do SEES será ainda mais significativo na segunda metade do século em regiões populosas dos trópicos e subtrópicos. Além disso, a identificação de *hotspots* e *clusters* espaciais, tais como na China, partes da África e em outras regiões dos trópicos e subtrópicos, evidencia heterogeneidades regionais, indicando que as projeções não se distribuem de forma uniforme pelo planeta e que, portanto, exigem políticas locais e específicas de prevenção às doenças associadas à exposição cotidiana, especialmente em áreas densamente povoadas e com menor capacidade de adaptação.

Embora existam incertezas naturais das projeções climáticas e das limitações dos modelos disponíveis, o uso de uma abordagem multimodelos e a validação com dados de reanálise garantem solidez aos resultados. Com isso, a análise estatística empregada nesse estudo confere ao SEES a capacidade de ser uma ferramenta promissora, capaz de avaliar de forma integrada, e em escala global, a exposição a fatores ambientais que afetam a saúde da pele.

Diante da sinergia dos estressores ambientes e dos cenários futuros observados, propomos que um termo mais abrangente seja utilizado no lugar de fotoproteção, uma vez que nosso estudo mostrou que o calor e a poluição são agentes deletérios adicionais e sinérgicos à exposição ao Sol. Neste sentido, o prefixo “exo-”, do grego antigo *ἔξω (éxō)*, leva à significação de uma proposta de proteção ao que vem de “fora”, “externo”, “do lado de fora”, “proteção contra tudo” ou “proteção total”. Em termos compostos, “exo-” costuma indicar algo externo ao sistema, à estrutura ou ao organismo. Assim, ao substituir o específico “foto-” pelo

abrangente “exo-”, propomos o termo “exoproteção”, que significa, de forma direta e intuitiva, a proteção da pele contra as agressões do expossoma externo: a luz (foto-), o calor (termo-) e os poluentes (aero- ou -pol), entre outros. Isto é, um termo que confere uma proteção completa da pele.

2.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALISOLTANI, T.; SHAFIEPOUR MOTLAGH, M.; ASHRAFI, K. Concurrent heat stress and air pollution episodes by considering future projection of climate change. **Scientific Reports**, v. 14, p. 29301, 2024. DOI: 10.1038/s41598-024-78700-z.

ALMAZROUI, M.; SAEED, F.; SAEED, S.; ISMAIL, M.; EHSAN, M. A.; ISLAM, M. N.; ABID, M. A.; O’BRIEN, E.; KAMIL, S.; RASHID, I. U.; NADEEM, I. Projected changes in climate Extremos using CMIP6 simulations over SREX regions. **Earth Systems and Environment**, v. 5, p. 481–497, 2021. DOI: 10.1007/s41748-021-00250-5.

AVILA-DIAZ, A.; BENEZOLI, V.; JUSTINO, F.; TORRES, R.; WILSON, A. Assessing current and future trends of climate Extremos across Brazil based on reanalyses and earth system model projections. **Climate Dynamics**, v. 55, p. 1403–1426, 2020. DOI: 10.1007/s00382-020-05333-z.

BAIS, A. F.; MCKENZIE, R. L.; BERNHARD, G.; AUCAMP, P. J.; ILYAS, M.; MADRONICH, S.; TOURPALI, K. Ozone depletion and climate change: impacts on UV radiation. **Photochemical & Photobiological Sciences**, v. 14, n. 1, p. 19–52, 2015. DOI: 10.1039/c4pp90032d.

BATHIANY, S.; DAKOS, V.; SCHEFDER, M.; LENTON, T. M. Climate models predict increasing temperature variability in poor countries. **Science Advances**, v. 4, n. 5, p. eaar5809, 2018. DOI: 10.1126/sciadv.aar5809.

BELZER, A.; PARKER, E. R. Climate change, skin health, and dermatologic disease: a guide for the dermatologist. **American Journal of Clinical Dermatology**, v. 24, n. 4, p. 577–593, 2023. DOI: 10.1007/s40257-023-00770-y.

BOSILOVICH, M. G.; LUCCHESI, R.; SUAREZ, M. 2016: MERRA-2: File Specification. GMAO Office Note No. 9 (Version 1.1), 73 pp, https://gmao.gsfc.nasa.gov/pubs/docs/Bosilovich785.pdf.

BOSILOVICH, M. G.; ROBERTSON, F. R.; TAKACS, L.; MOLOD, A.; MOCKO, D. Atmospheric water balance and variability in the MERRA-2 reanalysis. **Journal of Climate**, v. 30, n. 4, p. 1177–1196, 2017. DOI: 10.1175/JCLI-D-16-0338.1.

BOURDEAU-GOULET, S. C.; HASSANZADEH, E. Comparisons between CMIP5 and CMIP6 models: simulations of climate indices influencing food security, infrastructure resilience, and human health in Canada. **Earth’s Future**, 2021. DOI: 10.1029/2021EF001995.

BROWN, S. J. Future changes in heatwave severity, duration and frequency due to climate change for the most populous cities. **Weather and Climate Extremos**, v. 30, p. 100278, 2020. DOI: 10.1016/j.wace.2020.100278.

BUBATHI, V.; LESLIE, L.; SPEER, M.; HARTIGAN, J.; WANG, J.; GUPTA, A. Impact of accelerated climate change on maximum temperature differences between western and coastal Sydney. **Climate**, v. 11, n. 4, p. 76, 2023. DOI: 10.3390/cli11040076.

BUCKLEY, J. J. Fuzzy hierarchical analysis. **Fuzzy Sets and Systems**, v. 17, n. 3, p. 233-247, 1985. DOI: 10.1016/0165-0114(85)90090-9.

CARVALHO, V. S. B.; SILVA, P. N.; FREITAS, A. A.; TENÓRIO, V. L. S. R.; REBOITA, M. S.; ALBUQUERQUE, T. T. D. A.; MARTINS, L. D. Occurrence and atmospheric patterns associated with individual and compound heatwave–ozone events in São Paulo megacity. **Atmosphere**, v. 16, n. 7, p. 822, 2025. DOI: 10.3390/atmos16070822.

CHANG, K.-L.; MCDONALD, B. C.; HARKINS, C.; COOPER, O. R. Surface ozone trend variability across the United States and the impact of heat waves (1990–2023). **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 25, p. 5101–5132, 2025. DOI: 10.5194/acp-25-5101-2025.

CHANG, N.; FENG, R.; ZHIQIANG, G.; GAO, W. Skin cancer incidence is Altoly associated with ultraviolet-B radiation history. **International Journal of Hygiene and Environmental Health**, v. 213, n. 5, p. 359-368, 2010.

CHEN, J.; LIU, Y.; ZHAO, Z.; QIU, J. Oxidative stress in the skin: Impact and related protection. **International Journal of Cosmetic Science**, v. 43, n. 5, p. 495-509, 2021.

COHEN, J. A power primer. **Psychological Bulletin**, v. 112, n. 1, p. 155–159, 1992. DOI: https://doi.org/10.1037/0033-2909.112.1.155.

COLLAZO, S.; BARRUCAND, M.; RUSTICUCCI, M. Eventos compostos quentes e secos na América do Sul: clima atual e projeções futuras, e sua associação com o Oceano Pacífico. **Natural Hazards**, v. 119, p. 299–323, 2023. DOI: https://doi.org/10.1007/s11069-023-06119-2

CORONATO, T.; CARRIL, A. F.; ZANINELLI, P. G. et al. Exploring warm Extremos in South America: insights into regional climate change projections through dry-bulb and wet-bulb temperatures. **Climate Dynamics**, v. 62, p. 4391–4410, 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/s00382-024-07140-2.

CORRÊA, M. P. C.; BASTOS, I. R. P.; YAMAMOTO, A. L. C. A Global Score for Skin Environmental Exposure: Integrating UV radiation, Heat, and Pollution via Fuzzy Analytic Hierarchy Process. **International Journal of Biometeorology,** v.70, n.117, 2026.

CORRÊA, M. P. UVBoost: an erythemal weighted ultraviolet radiation estimator based on a machine learning gradient boosting algorithm. **Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer**, v. 298, p. 108490, 2023. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2023.108490.

DAHL, K.; LICKER, R.; ABATZOGLOU, J.; DECLET-BARRETO, J. Increased frequency of and population exposure to Extremo heat index days in the United States during the 21st century. **Environmental Research Communications**, v. 1, n. 7, p. 075002, 2019. DOI: 10.1088/2515-7620/ab27cf.

DEY, R.; LEWIS, S. C.; ARBLASTER, J. M.; ABRAM, N. J. A review of past and projected

changes in Australia's rainfall. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change**, v. 10, n. 3, p. e577, 2019. DOI: 10.1002/wcc.577.

DI GIULIO, G. M.; VASCONCELLOS, M. P.; GÜNTHER, W. M. R.; RIBEIRO, H.; ASSUNÇÃO, J. V. Percepção de risco: um campo de interesse para a interface ambiente, saúde e sustentabilidade. **Saúde e Sociedade**, v. 24, n. 4, p. 1360–1373, 2015. DOI: 10.1590/S0104-12902015136010.

EBI, K. L.; CAPON, A.; BERRY, P.; BRODERICK, C.; DE DEAR, R.; HAVENITH, G.; HONDA, Y.; KOVATS, R. S.; MA, W.; MALIK, A.; MORRIS, N. B.; NYBO, L.; SENEVRATNE, S. I.; VANOS, J.; JAY, O. Hot weather and heat Extremos: health risks. **The Lancet**, v. 398, p. 698–708, 2021.

EBI, K. L.; HESS, J. J. Health risks due to climate change: inequity in causes and consequences. **Health Affairs**, v. 39, n. 12, p. 2056–2062, 2020. DOI: 10.1377/hlthaFD.2020.01125.

ENVIRONMENT AND CLIMATE CHANGE CANADA. **Spring and summer weather hazards: humidex table**. Toronto: Department of National Defence, 2016. Available at: <http://www.ec.gc.ca/meteo-weather/default.asp?lang=En&n=6C5D4990-1#humidex>. Acesso em: 21 de janeiro de 2026.

EPA. **Technical Assistance Document for the Reporting of Daily Air Quality – the Air Quality Index (AQI).** Research Triangle Park: U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, 2018.

ESPINOZA, J.C; JIMENEZ, J.C.; MARENGO, J.A; SCHONGART, J.; RONCHAIL, J. LAVADO- CASIMIRO, W.; RIBEIRO, J. V. M. The new record of drought and warmth in the Amazon in 2023 related to regional and global climatic features. **Scientific Reports**, v. 14, n. 1, p. 8107, 2024. DOI: 10.1038/s41598-024-58782-5.

EYRING, V.; BONY, S.; MEEHL, G. A.; et al. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. **Geoscientific Model Development**, v. 9, n. 5, p. 1937–1958, 2016. DOI: 10.5194/gmd-9-1937-2016.

FANG, P.; WANG, T.; YANG, D.; TANG, L.; YANG, Y. Substantial increases in compound climate Extremos and associated socio-economic exposure across China under future climate change. **Climate and Atmospheric Science**, v. 8, n. 17, 2025. DOI: 10.1038/s41612-025-00910-7.

FAQEIH, K. Y.; EL MELKI, M. N.; ALAMRI, S. M.; ALAMRI, A. R.; ALDUBEHI, M. A.; ALAMERY, E. R. Projected urban air pollution in Riyadh using CMIP6 and Bayesian modeling. **Sustainability**, v. 17, n. 14, p. 6288, 2025. DOI: 10.3390/su17146288.

FISCHER, E. M.; SIPPEL, S.; KNUTTI, R. Increasing probability of record-shattering climate Extremos. **Nature Climate Change**, v. 11, n. 8, p. 689–695, 2021. DOI: 10.1038/s41558-021-01092-9.

FOTSO-NGUEMO, T.; WEBER, T.; DIEDHIOU, A.; CHOUTO, S.; VONDOU, D. A.; RECHID, D.; JACOB, D. Projected impact of increased global warming on heat stress and exposed population over Africa. **Earth's Future**, v. 11, art. e2022EF003268, 2023. DOI:

10.1029/2022EF003268.

FREYCHET, N.; HEGERL, G.; MITCHELL, D.; COLLINS, M. Future changes in the frequency of temperature Extremos may be underestimated in tropical and subtropical regions. **Communications Earth & Environment**, v. 2, art. 28, 2021. DOI: 10.1038/s43247-021-00094-x.

GAO, M.; WANG, F.; XU, Y.; CHEN, J.; LU, X.; CARMICHAEL, G. R. Future intensification of co-occurrences of heat, PM2.5 and O3 Extremos in China and India despite stringent air pollution controls. **Environmental Research Letters**, v. 20, n. 1, p. 014044, 2025. DOI: 10.1088/1748-9326/ad961d.

GARRIDO-PEREZ, J. M.; ORDÓÑEZ, C.; GARCÍA-HERRERA, R.; BARRIOPEDRO, D. Air stagnation in Europe: spatiotemporal variability and impact on air quality. **Science of The Total Environment**, v. 645, p. 1238–1252, 2018. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.07.238.

HERSBACH, H.; BELL, B.; BERRISFORD, P.; HIRAHARA, S.; HORÁNYI, A.; MUÑOZ SABATER, J.; NICOLAS, J.; PEUBEY, C.; RADU, R.; SCHEPERS, D.; SIMMONS, A.; SOCI, C.; ABDALLA, S.; ABELLAN, X.; BALSAMO, G.; BECHTOLD, P.; BIAVATI, G.; BIDLOT, J.; BONAVITA, M.; DE CHIARA, G.; DAHLGREN, P.; DEE, D.; DIAMANTAKIS, M.; DRAGANI, R.; FLEMMING, J.; FORBES, R.; FUENTES, M.; GEER, A.; HAIMBERGER, L.; HEALY, S.; HOGAN, R. J.; HÓLM, E.; JANISKOVÁ, M.; KEELEY, S.; LALOYAUX, P.; LOPEZ, P.; LUPU, C.; RADNOTI, G.; DE ROSNAY, P.; ROZUM, I.; VAMBORG, F.; VILLAUME, S.; THÉPAUT, J.-N. The ERA5 global reanalysis. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 146, n. 730, p. 1999-2049, 2020.

HORTON, D. E.; SKINNER, C. B.; SINGH, D.; DIFFENBAUGH, N. S. Occurrence and persistence of future atmospheric stagnation events. **Nature Climate Change**, v. 4, p. 698–703, 2014. DOI: 10.1038/nclimate2272.

IPCC, 2022: **Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.

JACKSON, L. S.; BIRCH, C. E.; CHAGNAUD, G.; MARSHAM, J. H.; TAYLOR, C. M. Daily rainfall variability controls humid heatwaves in the global tropics and subtropics. **Nature Communications**, v. 16, p. 3461, 2025. DOI: 10.1038/s41467-025-3461-0.

JACKSON, L. S.; BIRCH, Cathryn E.; CHAGNAUD, Guillaume; MARSHAM, John H.; TAYLOR, C. M. Daily rainfall variability controls humid heatwaves in the global tropics and subtropics. **Nature Communications**, v. 16, Art. 3461, 2025. DOI: 10.1038/s41467-025-58694-6.

JOHN, J. G.; BLANTON, C.; MCHUGH, C.; RADHAKRISHNAN, A.; RAND, K.; VAHLENKAMP, H.; WILSON, C.; ZADEH, N. T.; DUNNE, J. P.; DUSSIN, R.; HOROWITZ, L. W.; KRASTING, J. P.; LIN, P.; MALYSHEV, S.; NAIK, V.; PLOSHAY, J.; SHEVLIAKOVA, E.; SILVERS, L.; STOCK, C.; WINTON, M.; ZENG, Y. **NOAA GFDL**

GFDL-ESM4 model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP. Version 20180701. Earth System Grid Federation. 2018. https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.1414.

KIM, Y.-H.; MIN, S.-K.; ZHANG, X.; SILLMANN, J.; SANDSTAD, M. Evaluation of the CMIP6 multi-model ensemble for climate Extremo indices. **Weather and Climate Extremos**, v. 29, p. 100269, 2020. DOI:10.1016/j.wace.2020.100269.

KJELLSTROM, T.; FREYBERG, C.; LEMKE, B.; OTTO, M.; BRIGGS, D. Estimating population heat exposure and impacts on working people in conjunction with climate change. **International Journal of Biometeorology**, v. 62, p. 291–306, 2018. DOI: 10.1007/s00484-017-1407-0.

KRASTING, J. P.; JOHN, J. G.; BLANTON, C.; MCHUGH, C.; NIKONOV, S.; RADHAKRISHNAN, A.; RAND, K.; ZADEH, N. T.; BALAJI, V.; DURACHTA, J.; DUPUIS, C.; MENZEL, R.; ROBINSON, T.; UNDERWOOD, S.; VAHLENKAMP, H.; DUNNE, K. A.; GAUTHIER, P. P. G.; GINOUX, P.; GRIFDIES, S. M.; HALLBERG, R.; HARRISON, M.; HURLIN, W.; MALYSHEV, S.; NAIK, V.; PAULOT, F.; PAYNTER, D. J.; PLOSHAY, J.; REICHL, B. G.; SCHWARZKOPF, D. M.; SEMAN, C. J.; SILVERS, L.; WYMAN, B.; ZENG, Y.; ADCROFT, A.; DUNNE, J. P.; DUSSIN, R.; GUO, H.; HE, J.; HELD, I. M.; HOROWITZ, L. W.; LIN, PU.; MILLY, P. C. D.; SHEVLIAKOVA, E.; STOCK, C.; WINTON, M.; WITTENBERG, A. T.; XIE, Y.; ZHAO, M. **NOAA-GFDL GFDL-ESM4 model output prepared for CMIP6 CMIP historical.** Version 20190726. Earth System Grid Federation. 2018. https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.8597.

KOO, T. K.; LI, M. Y. A guideline of selecting and reporting intraclass correlation coeFDicients for reliability research. **Journal of Chiropractic Medicine**, v. 15, n. 2, p. 155–163, 2016. DOI: 10.1016/j.jcm.2016.02.012.

KRUTMANN, J.; BOULOC, A.; SORE, G.; BERNARD, B. A.; PASSERON, T. The skin aging exposome. **Journal of Dermatological Science**, v. 85, n. 3, p. 152-161, 2017.

KUMAR, R.; GOPIKRISHNAN, G. S.; KUTTIPPURATH, J. Rapid changes in warm and cold Extremos in recent decades and their future projections for India. **Journal of Environmental Management**, v. 387, p. 125832, 2025. DOI: 10.1016/j.jenvman.2025.125832.

LE, T. D. N. Climate change adaptation in coastal cities of developing countries: characterizing types of vulnerability and adaptation options. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, v. 25, n. 5, p. 739–761, 2020. DOI: 10.1007/s11027-019-09888-z.

LIN, M. J.; TORBECK, R. L.; DUBIN, D. P.; LIN, C. E.; KHORASANI, H. Climate change and skin cancer. **Journal of the European Academy of Dermatology and Venereology**, v. 33, n. 9, p. e324-e325, 2019. DOI: 10.1111/jdv.15622.

MACFARLAND, T.W.; YATES, J.M. (2016). Mann–Whitney U Test. **Introduction to Nonparametric Statistics for the Biological Sciences Using R**. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-30634-6_4.

MARENGO, J. A. Long-term variability, Extremos and changes in observed hydroclimatic trends and future climate projections for the Amazon. **Acta Amazonica**, v. 54, p. e021, 2024. DOI: https://doi.org/10.1590/1809-4392202200980.

MARROT, L. Pollution and Sun Exposure: A Deleterious Synergy. Mechanisms and Opportunities for Skin Protection. **Current Medicinal Chemistry**, v. 25, p. 5469-5486, 2018.

MOLINA, M. O.; SOARES, P. M. M.; LIMA, M. M.; GASPAR, T. H.; LIMA, D. C. A.; RAMOS, A. M.; RUSSO, A.; TRIGO, R. M. Updated insights on climate change-driven temperature variability across historical and future periods. **Climatic Change**, v. 178, p. 97, 2025. DOI: 10.1007/s10584-025-03937-0.

MONSELISE, A.; COHEN, D. E.; WANSER, R.; SHAPIRO, J. What Ages Hair?. **International Journal of Women's Dermatology**, v. 3, n. 1, p. S52-S57, 2017.

ORTIZ, L. E.; GONZÁLEZ, J. E.; HORTON, R.; LIN, W.; WU, W.; RAMAMURTHY, P.; AREND, M.; BORNSTEIN, R. D. Alto-resolution projections of Extremo heat in New York City. **International Journal of Climatology**, v. 39, n. 2, p. 4721-4735, 2019. DOI: 10.1002/joc.6102.

PARRY, L.; RADEL, C.; ADAMO, S. B.; CLARK, N.; COUNTERMAN, M.; FLORES-YEFDAL, N.; PONS, D.; ROMERO-LANKAO, P.; VARGO, J. The (in)visible health risks of climate change. **Social Science & Medicine**, v. 241, p. 112448, 2019. DOI: 10.1016/j.socscimed.2019.112448.

PASSERON, T.; KRUTMANN, J.; ANDERSEN, M. L.; KATTA, R.; ZOUBOULIS, C. C. Clinical and biological impact of the exposome on the skin. **Journal of The European Academy of Dermatology and Venereology**, v. 34, p. 4–25, 2020.

PASQUINI, L.; VAN AARDENNE, L.; GODSMARK, C. N.; LEE, J.; JACK, C. Emerging climate change-related public health challenges in Africa: a case study of the heat-health vulnerability of informal settlement residents in Dar es Salaam, Tanzania. **Science of the Total Environment**, v. 747, p. 141355, 2020. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141355

PREVIDI, M.; SMITH, K. L.; POLVANI, L. M. Arctic amplification of climate change: a review of underlying mechanisms. **Environmental Research Letters**, v. 16, n. 9, p. 093003, 2021. DOI: 10.1088/1748-9326/ac1c29.

PURI, P.; NANDAR, S. K.; KATHURIA, S.; RAMESH, V. EFDects of air pollution on the skin: A review. **Indian Journal of Dermatology, Venereology, and Leprology**, v. 83, n. 4, p. 415 423, 2017.

RAYMOND, C.; MATTHEWS, T.; HORTON, R. M. The emergence of heat and humidity too severe for human tolerance. **Science Advances**, v. 6, n. 19, 2020. DOI: 10.1126/sciadv.aaw1838.

REN, F.; LIN, J.; XU, C.; ADENIRAN, J. A.; WANG, J.; MARTIN, R. V.; VAN DONKELAAR, A.; HAMMER, M. S.; HOROWITZ, L. W.; TURNOCK, S. T.; OSHIMA, N.; ZHANG, J.; BAUER, S.; TSIGARIDIS, K.; SELAND, Ø.; NABAT, P.; NEUBAUER, D.; STRAND, G.; VAN NOIJE, T.; LE SAGER, P.; TAKEMURA, T. Evaluation of CMIP6 model simulations of PM2.5 and its components over China. **Geoscientific Model Development**, v. 17, p. 4821–4836, 2024. DOI: 10.5194/gmd-17-4821-2024.

RIAHI, K.; VAN VUUREN, D.P.; KRIEGLER, E.; EDMONDS, J.; O'NEILL, B.C.; FUJIMORI, S.; BAUER, N.; CALVIN, K.; DELLINK, R.; FRICKO, O.; LUTZ, W.; POPP, A.; CUARESMA, J.C.; KC, S.; LEIMBACH, M.; JIANG, L.; KRAM, T.; RAO, S.; EMMERLING, J.; EBI, K.; HASEGAWA, T.; HAVLIK, P.; HUMPENODER, F.; SILVA, L. A.; SMITH, S.; STEHFEST, E.; BOSETTI, V.; EOM, J.; GERNAAT, D.; MASUI, T.; ROGELJ, J.; STREFLER, J.; DROUET, L.; KREY, V.; LUDERER, G.; HARMSEN, M.; TAKAHASHI, K.; BAUMSTARK, L.; DOELMAN, J. C.; KAINUMA, M.; KLIMONT, Z.; MARANGONI, G.; LOTZE-CAMPEN, H.; OBERSTEINER, M.; TABEAU, A.; TAVONI, M. The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: an overview. **Global Environmental Change**, v.42, p.153 168, 2017. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009.

RIVERA, J. A.; ARIAS, P. A.; SÖRENSSON, A. A.; ZACHARIAH, M.; BARNES, C.; PHILIP, S.; KEW, S.; VAUTARD, R.; KOREN, G.; PINTO, I.; VAHLBERG, M.; SINGH, R.; RAJU, E.; LI, S.; YANG, W.; VECCHI, G. A.; HARRINGTON, L. J.; OTTO, F. E. L. 2022 early-summer heatwave in Southern South America: 60 times more likely due to climate change. **Climatic Change**, v. 176, art. 102, 2023. DOI: https://doi.org/10.1007/s10584-023-03599-9

SAATY, R. W. The Analytic Hierarchy Process – What it is and how it is used. **Applied Mathematical Modelling**, v. 9, n. 3-5, p. 161-176, 1987. DOI: 10.1016/0270-0255(87)90473-8.

SHEERAN, P.; HARRIS, P. R.; EPTON, T. Does heightening risk appraisals change people's intentions and behavior? A meta-analysis of experimental studies. **Psychological Bulletin**, v. 140, n. 2, p. 511–543, 2014. DOI: 10.1037/a0033065.

SHELDON, M.R.; FILLYAW, M.J.; THOMPSON, W.D. The use and interpre tation of the Friedman test in the analysis of ordinal-scale data in repeated measures designs. **Physiotherapy Research International**, v. 1, n. 4, p. 221–228, 1996. DOI: https://doi.org/10.1002/pri.66.

SHUKLA, K. K.; ATTADA, R. CMIP6 models informed summer human thermal discomfort conditions in Indian regional hotspot. **Scientific Reports**, v. 13, art. 12549, 2023. DOI: 10.1038/s41598-023-38602-y.

SIMPSON, I. R.; SHAW, T. A.; CEPPI, P.; CLEMENT, A. C.; FISCHER, E.; GRISE, K. M.; PENDERGRASS, A. G.; SCREEN, J. A.; WILLS, R. C. J.; WOOLLINGS, T.; BLACKPORT, R.; KANG, J. M.; PO-CHEDLEY, S. Confronting Earth System Model trends with observations. **Science Advances**, v. 11, n. 11, 2025. DOI: 10.1126/sciadv.adt8035.

SNEDECOR, G.W.; COCHRAN, W.G. **Statistical Methods**, 8th ed. Iowa State University Press, Ames. 1989.

SÖZENER, Z. Ç.; TREFFEISEN, E. R.; ÖZDEL ÖZTÜRK, B.; SCHNEIDER, L. C. Global warming and implications for epithelial barrier disruption and respiratory and dermatologic allergic diseases. **Journal of Allergy and Clinical Immunology**, v. 152, n. 5, p. 1033–1046, 2023. DOI: 10.1016/j.jaci.2023.09.001.

SUN, Q.; MIAO, C.; HANEL, M.; BORTHWICK, A. G. L.; DUAN, Q.; JI, D.; LI, H. Global heat stress on health, wildfires, and agricultural crops under different levels of climate warming.

Environment International, v. 128, p. 125–136, 2019. DOI: 10.1016/j.envint.2019.04.025.

TIAN, C.; YUE, X.; ZHU, J.; LIAO, H.; YANG, Y.; CHEN, L.; ZHOU, X.; LEI, Y.; ZHOU, H.; CAO, Y. Projections of fire emissions and the consequent impacts on air quality under 1.5 °C and 2 °C global warming. **Environmental Pollution**, v. 323, p. 121311, 2023. DOI: 10.1016/j.envpol.2023.121311.

THOMPSON, R. F.; SPENCER, W. A. Habituation: a model phenomenon for the study of neuronal substrates of behavior. **Psychological Review**, v. 73, n. 1, p. 16–43, 1966. DOI: 10.1037/h0022681.

ZEPPETELLO, L. R. V.; RAFTERY, A. E.; BATTISTI, D. S. Probabilistic projections of increased heat stress driven by climate change. **Communications Earth & Environment**, v. 3, p. 183, 2022. DOI: 10.1038/s43247-022-00524-4.
VECCHI, R.; RIPPER, J. S. C.; ROY, D.; BRETON, L.; MARCIANO, A. G.; SOUZA, P. M. B. S.; CORREA, M. P. Using wearable devices for assessing the impacts of hair exposome in Brazil. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 1–10, 2019.

WATSON, T. P. G.; TONG, M.; BAILIE, J.; EKANAYAKE, K.; BAILIE, R. S. Relationship between climate change and skin cancer and implications for prevention and management: a scoping review. **Public Health**, v. 227, p. 243–249, 2024. DOI:10.1016/j.puhe.2023.12.003.

WHO. **Global Solar UV Index: A Practical Guide.** Geneva: World Health Organization (WHO), World Meteorological Organization (WMO), United Nations Environment Program (UNEP), and International Commission on Non- Ionising Radiation Protection (ICNRP), 2002.

WILCOX, R. Kolmogorov–Smirnov Test. In: Encyclopedia of Biostatistics. Chichester: John Wiley & Sons, 2005. DOI: 10.1002/0470011815.b2a15064.

XIA, W.; WANG, Y.; ZHANG, G. J.; WANG, B. Light precipitation rather than total precipitation determines aerosol wet removal. **Environmental Science & Technology**, v. 58, n. 43, p. 19222–19230, 2024. DOI: 10.1021/acs.est.4c07684.

XIE, Y.; LIN, M.; DECHARME, B.; et al. Tripling of western US particulate pollution from wildfires in a warming climate. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 119, n. 14, p. e2111372119, 2022. DOI: 10.1073/pnas.2111372119.

XU, Y.; LAMARQUE, J.-F.; SANDERSON, B. M. The importance of aerosol scenarios in projections of future heat Extremos. **Climatic Change**, v. 146, p. 393–406, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s10584-015-1565-1.

YAMAMOTO, A. L. C.; CORRÊA, M. P.; TORRES, R. R.; MARTINS, F. B.; GODIN BEEKMANN, S. Projected changes in ultraviolet index and UV doses over the twenty-first century: impacts of ozone and aerosols from CMIP6. **Photochemical & Photobiological Sciences**, v. 23, p. 1279-1294, 2024a. DOI: 10.1007/s43630-024-00594-7.

YAMAMOTO, A. L. C.; CORRÊA, M. P.; TORRES, R. R.; MARTINS, F. B.; GODIN-BEEKMANN, S. Total ozone content, total cloud cover, and aerosol optical depth in CMIP6: simulations performance and projected changes. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 155, n. 3, p. 2453–2471, 2024b. DOI: 10.1007/s00704-023-04821-6.

YUKIMOTO, S.; KOSHIRO, T.; KAWAI, H.; OSHIMA, N.; YOSHIDA, K.; URAKAWA, S.; TSUJINO, H.; DEUSHI, M.; TANAKA, T.; HOSAKA, M.; YOSHIMURA, H.; SHINDO, E.; MIZUTA, R.; ISHII, M.; OBATA, A.; ADACHI, Y. **MRI MRI-ESM2.0 model output prepared for CMIP6 CMIP historical.** Version 20200207. Earth System Grid Federation. 2019a. https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.6842.

YUKIMOTO, S.; KOSHIRO, T.; KAWAI, H.; OSHIMA, N.; YOSHIDA, K.; URAKAWA, S.; TSUJINO, H.; DEUSHI, M.; TANAKA, T.; HOSAKA, M.; YOSHIMURA, H.; SHINDO, E.; MIZUTA, R.; ISHII, M.; OBATA, A.; ADACHI, Y. **MRI MRI-ESM2.0 model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP.** Version 20200222. Earth System Grid Federation. 2019b. https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.638.

ZHANG, Y.; CHEN, C.; NIU, Y.; SHEN, L.; WANG, W. The severity of heat and cold waves amplified by Alto relative humidity in humid subtropical basins: a case study in the Gan River Basin, China. **Natural Hazards**, v. 115, p. 865–898, 2023. DOI: 10.1007/s11069-022-05556-3.

ZHANG, Y.; HELD, I.; FUEGLISTALER, S. Projections of tropical heat stress constrained by atmospheric dynamics. **Nature Geoscience**, v. 14, p. 133–137, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1038/s41561-021-00695-3

ZHANG, Y.; XIN, J.; HU, W.; XIU, M.; WANG, S. Projecting temperature-related excess mortality under climate change in six metropolitan cities in China. **Urban Climate**, v. 59, p. 102270, 2025. DOI: 10.1016/j.uclim.2024.102270.

ZHU, H.; JIANG, Z.; LI, J.; LI, W.; SUN, C.; LI, L. Does CMIP6 inspire more confidence in simulating climate Extremos over China? **Advances in Atmospheric Sciences**, v. 37, n. 10, p. 1119–1132, 2020. DOI: 10.1007/s00376-020-9289-1.

ZIENELDIEN, T.; MA, S.; TAN, I. J.; KIM, J.; BUSOT, D.; COHEN, B. A. The environmental determinants of skin health: linking climate change, air pollution, and the dermatologic disease burden. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 22, n. 12, p. 1820, 2025. DOI: 10.3390/ijerph22121820.

ZITTIS, G.; LAZOGLOU, G.; HADJINICOLAOU, P. et al. Emerging Extremo heat conditions as part of the new climate normal. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 155, p. 143–150, 2024. DOI: 10.1007/s00704-023-04605-y.

ZUBOV, V.; ROZANOV, E.; EGOROVA, T. Projection of the UV radiation for vitamin D production changes between 2015–2024 and 2090–2099 periods. **Atmosphere**, v. 16, n. 6, p. 686, 2025. DOI: 10.3390/atmos16060686.

APÊNDICE CAPÍTULO II

A distribuição espacial do viés da AOD550 indica, de modo geral, baixos desvios para os três modelos, com erros concentrados principalmente sobre regiões de elevada carga de aerossóis, como o sul e leste da Ásia. O MRI-ESM2-0 apresenta as maiores superestimações nessas áreas, enquanto o GFDL-ESM4 exibe vieses mais moderados. Como resultado, o ensemble mean reduz a magnitude dos erros locais e produz uma distribuição de viés mais homogênea. Para o CTO, observa-se um contraste marcante entre os modelos individuais. O MRI-ESM2-0 apresenta superestimações generalizadas em praticamente todo o globo, especialmente nas altas latitudes, enquanto o GFDL-ESM4 apresenta predominantemente subestimações. A combinação dos dois modelos no ensemble mean reduz esses erros sistemáticos, resultando em vieses mais próximos de zero na maior parte das regiões.

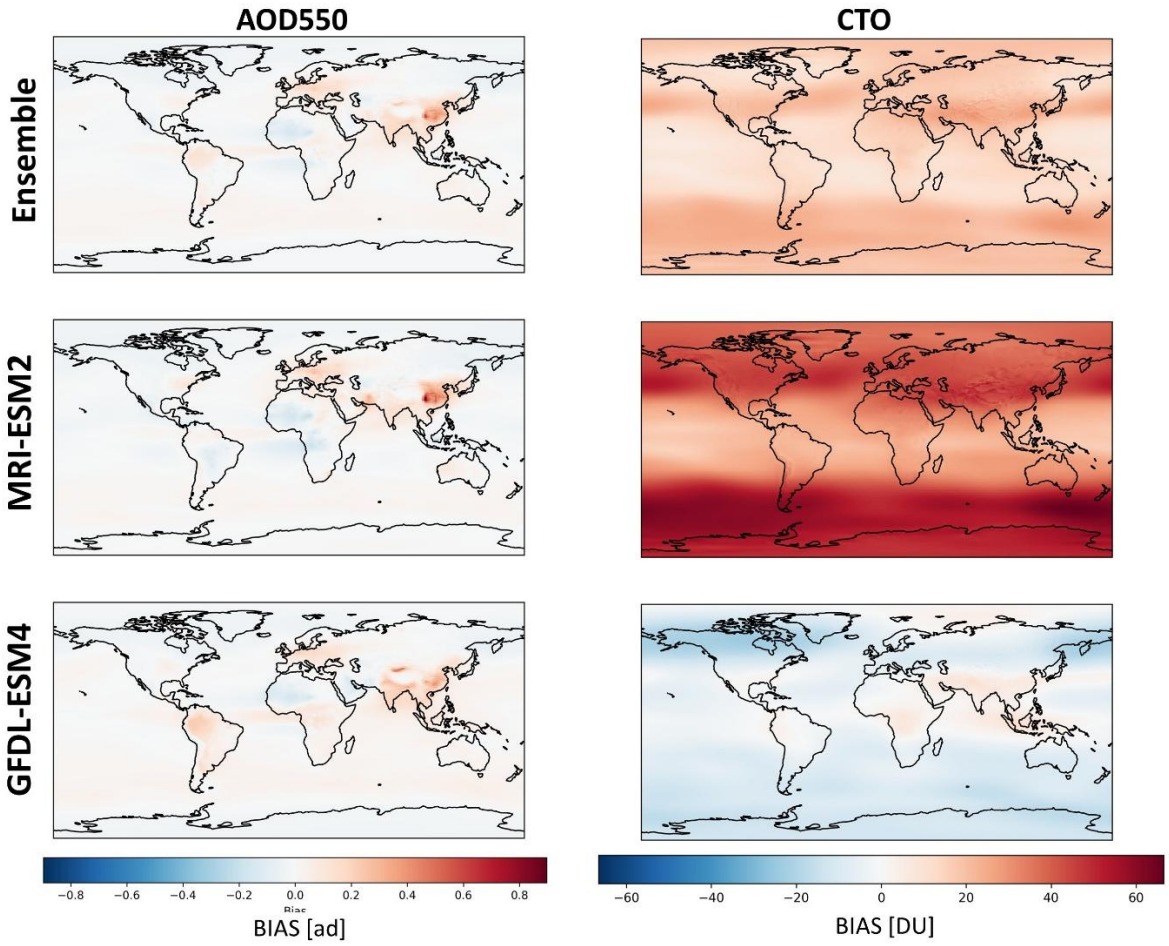


Figura A1- Distribuição espacial do BIAS da profundidade óptica do aerossol a 550 nm (AOD550) e conteúdo total de ozônio (CTO) média anual simulada por dois modelos do CMIP6 e o ensemble mean, para o período 1980-2014.

A distribuição espacial do BIAS do $PM_{2.5}$ revela maior variabilidade regional em comparação às demais variáveis. Os maiores desvios positivos concentram-se sobre o norte da Índia, leste da China e partes do Oriente Médio, enquanto áreas da África e regiões oceânicas adjacentes apresentam predominância de vieses negativos. O MRI-ESM2-0 apresenta as maiores superestimações sobre o continente asiático, ao passo que o GFDL-ESM4 apresenta desvios de menor magnitude e distribuição espacial mais dispersa. O ensemble mean reduz a intensidade dos erros localizados, mantendo os principais padrões espaciais observados nos modelos individuais. Já a distribuição espacial do BIAS do SO_2 caracteriza-se pela presença de desvios localizados em regiões associadas a elevadas emissões antrópicas, como Europa, Oriente Médio, Índia e leste da China. Em ambos os modelos predominam vieses positivos nessas áreas, embora com diferenças na intensidade e extensão espacial. O ensemble mean reproduz os principais núcleos de erro observados nos modelos individuais, apresentando magnitudes intermediárias e distribuição espacial mais uniforme.

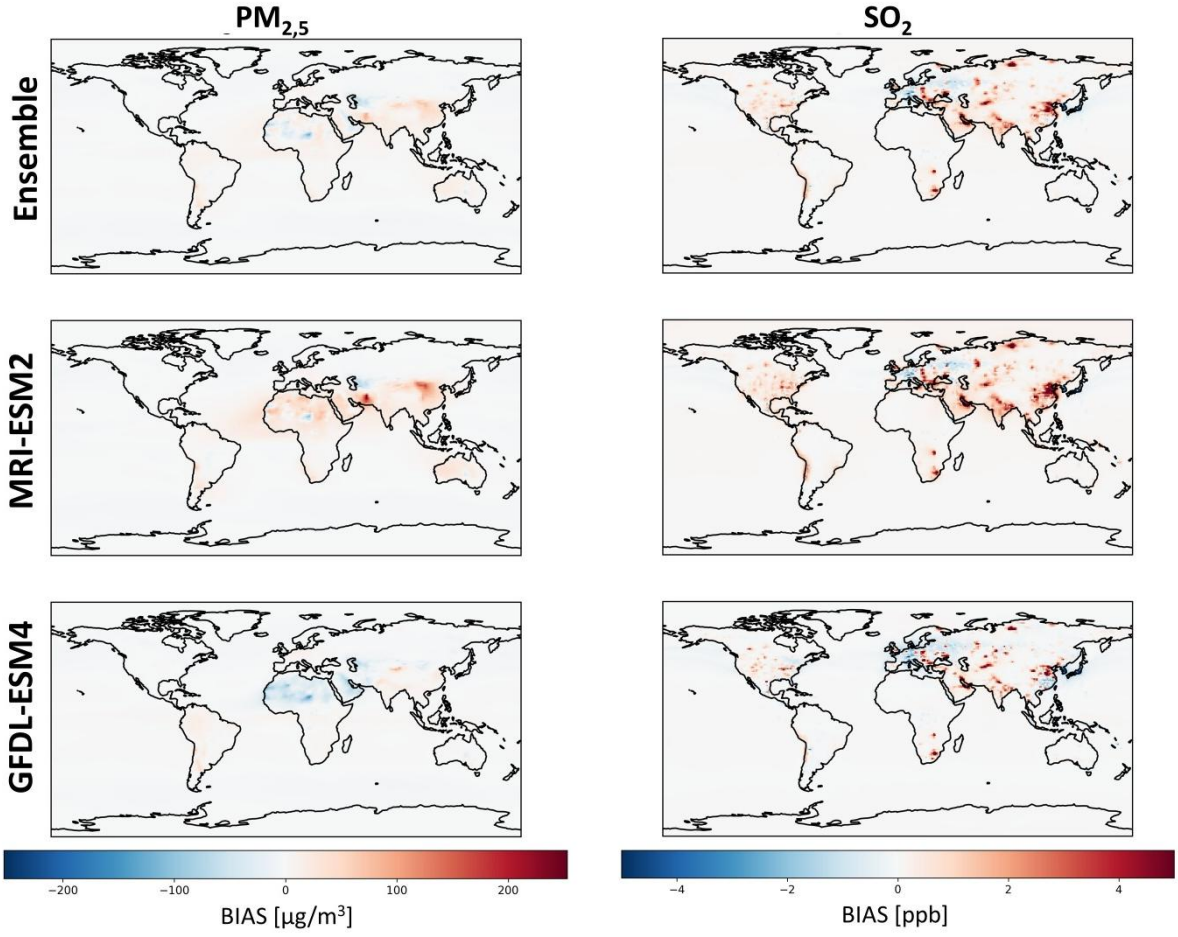


Figura A2 - Distribuição espacial do BIAS da concentração de material particulado 2,5 µm ($PM_{2,5}$) e concentração de dióxido de enxofre (SO_2) média anual simulada por dois modelos do CMIP6 e o ensemble mean, para o período 1980-2014.

Em relação ao BIAS do O_3, há desvios positivos sobre regiões tropicais e subtropicais, especialmente na África Central, Península Arábica e sul da Ásia. O MRI-ESM2-0 reproduz os maiores valores positivos nessas regiões, enquanto o GFDL-ESM4 apresenta magnitudes mais reduzidas e distribuição espacial mais uniforme. O ensemble mean mantém os principais padrões observados nos modelos individuais, porém com menor intensidade dos desvios positivos nas áreas de maior concentração. Já os mapas de BIAS do Humidex mostram predominância de desvios negativos em grande parte do globo, com destaque para as altas latitudes do Hemisfério Norte, Ásia Central e Oceano Austral. Os dois modelos individuais apresentam padrões espaciais semelhantes, diferindo principalmente na magnitude dos desvios. O ensemble mean preserva essa distribuição espacial, apresentando valores intermediários entre aqueles observados para o MRI-ESM2-0 e o GFDL-ESM4.

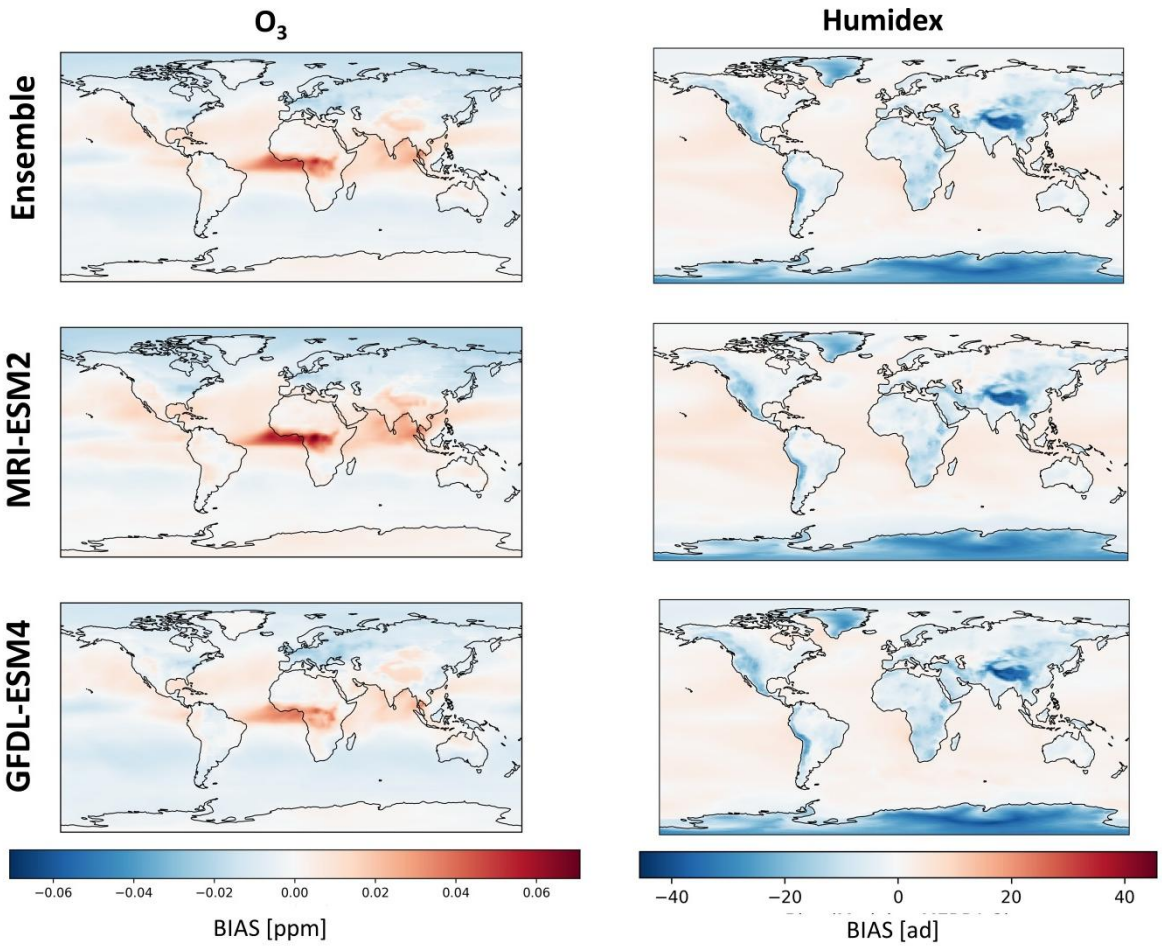


Figura A3 - Distribuição espacial do BIAS da concentração de ozônio em superfície (O_3) e Humidex média anual simulada por dois modelos do CMIP6 e o ensemble mean, para o período 1980-2014.

Os padrões espaciais observados complementam os resultados das métricas globais apresentados na Tabela 2.4. Embora os valores médios de BIAS sejam próximos de zero para a maioria das variáveis, os mapas evidenciam a existência de regiões com superestimações e subestimações localizadas que podem ser compensadas na média global. Esse comportamento é particularmente evidente para CTO, $PM_{2.5}$ e SO_2. Em contrapartida, AOD550 e O_3 apresentam distribuições espaciais mais homogêneas e desvios de menor magnitude, consistentes com os baixos valores de BIAS observados globalmente. De maneira geral, o ensemble mean apresenta padrões espaciais mais equilibrados em relação aos modelos individuais, refletindo a compensação parcial entre erros de sinais opostos e contribuindo para os resultados globais obtidos na avaliação de desempenho.

CONCLUSÃO GERAL

Esta tese apresentou o desenvolvimento e a aplicação do *Skin Environmental Exposure Score* (SEES), uma métrica inédita voltada à avaliação integrada dos riscos ambientais à saúde da pele, considerando simultaneamente os efeitos da RUV, estresse térmico e poluição atmosférica. A proposta do SEES surgiu da necessidade de superar a limitação dos indicadores ambientais tradicionalmente utilizados, os quais avaliam cada fator de forma isolada, sem considerar os efeitos combinados e potencialmente sinérgicos entre diferentes exposições ambientais.

A utilização do método *Fuzzy Analytical Hierarchy Process* (F-AHP) permitiu estruturar uma abordagem multicritério robusta e consistente para determinação dos pesos relativos dos fatores ambientais associados ao expossoma extrínseco da pele. A adoção da média geométrica ponderada mostrou-se particularmente adequada para a formulação do SEES, garantindo maior sensibilidade à ocorrência simultânea de condições ambientais extremas e evitando que exposições críticas fossem mascaradas por valores moderados de outros componentes ambientais.

A aplicação do SEES em escala global evidenciou forte variabilidade espacial e sazonal dos riscos ambientais à saúde cutânea. Regiões tropicais e subtropicais apresentaram os maiores níveis de exposição integrada, especialmente sob condições simultâneas de elevada RUV, calor extremo e poluição atmosférica. Adicionalmente, áreas urbanizadas e regiões de alta altitude mostraram elevada vulnerabilidade ambiental, reforçando a importância das interações entre fatores climáticos e atmosféricos na intensificação do risco ambiental.

As projeções futuras baseadas nos modelos do CMIP6 sob um cenário de desenvolvimento global marcado por altas emissões de gases de efeito estufa (i.e. SSP5-8.5) indicaram tendência consistente de intensificação do SEES ao longo do século XXI, principalmente em regiões tropicais e subtropicais. Os resultados sugerem que as mudanças climáticas poderão ampliar significativamente a frequência e a severidade de eventos ambientais compostos envolvendo calor extremo, poluição atmosférica e elevada radiação ultravioleta, aumentando os riscos associados ao expossoma cutâneo.

Além da contribuição metodológica e científica, os resultados obtidos nesta tese evidenciam o potencial do SEES como ferramenta de suporte para estratégias de contenção ao risco ambiental, prevenção em saúde e adaptação climática. A viabilização prática do SEES, depende, da disponibilização operacional depende da integração aos sistemas que já processam rotineiramente os insumos necessários (UVI, temperatura, umidade relativa e concentrações de poluentes), como os boletins do CPTEC/INPE, da CETESB e de redes estaduais de qualidade do ar, por meio de uma interface (API) ou painel público capaz de calcular o SEES em tempo quase real a partir de dados já monitorados, aproveitando a arquitetura de classificação apresentada na Tabela 1.8. Ou, então, a incorporação do SEES a sistemas de alerta de saúde pública já existentes, como os alertas de onda de calor e de qualidade do ar emitidos pelo INMET, pela Defesa Civil e por secretarias municipais de saúde, permitiria comunicar o risco composto à saúde da pele sem exigir a criação de uma infraestrutura de monitoramento paralela. Também, sua apropriação por políticas públicas e pela comunicação de risco depende da tradução do escore em recomendações comportamentais objetivas, associadas a cada categoria de risco (fotoproteção reforçada, hidratação cutânea, redução de exposição ao ar livre), bem como de parcerias com sociedades médicas (Sociedade Brasileira de Dermatologia) e gestores de saúde ambiental para validação clínica e ajuste dos limiares em populações específicas.

Os resultados também demonstram que o conceito tradicional de fotoproteção torna-se insuficiente diante da complexidade do expossoma extrínseco. Embora amplamente utilizado na dermatologia e na saúde pública, esse termo permanece historicamente associado predominantemente à proteção contra a radiação solar. Contudo, os resultados obtidos indicam que o estresse térmico e a poluição atmosférica representam fatores adicionais relevantes e potencialmente sinérgicos aos efeitos da RUV, especialmente em cenários futuros de mudanças climáticas. Nesse contexto, propõe-se o conceito de “exoproteção”, entendido como uma abordagem integrada de proteção contra os múltiplos componentes do expossoma externo que afetam a saúde da pele.

A noção de exoproteção amplia a perspectiva convencional de prevenção ao reconhecer que a exposição ambiental cotidiana resulta da interação simultânea entre diferentes estressores ambientais. Dessa forma, estratégias preventivas futuras não devem se restringir apenas à fotoproteção individual, mas incorporar também medidas relacionadas à mitigação do calor urbano, melhoria da qualidade do ar, ampliação da arborização urbana e de áreas de sombreamento, fortalecimento de políticas de controle de emissões atmosféricas, implementação de sistemas integrados de monitoramento ambiental e incorporação de alertas ambientais em serviços meteorológicos e de saúde pública. Em regiões tropicais e subtropicais, onde os maiores aumentos do SEES foram identificados, essas estratégias tornam-se particularmente relevantes diante da crescente intensificação de eventos extremos ao longo do século XXI.

Como perspectivas futuras, recomenda-se a incorporação de novos componentes do expossoma externo ao SEES, incluindo partículas ultrafinas, compostos orgânicos voláteis, fatores ocupacionais e indicadores socioeconômicos associados à vulnerabilidade ambiental. Adicionalmente, estudos futuros poderão integrar dados epidemiológicos, dermatológicos e clínicos ao índice, permitindo avaliações mais robustas dos impactos ambientais sobre diferentes populações. A aplicação operacional do SEES em plataformas meteorológicas, aplicativos móveis e sistemas de alerta em tempo real também representa uma perspectiva promissora para ampliar sua utilização em ações preventivas, comunicação de risco e planejamento em saúde pública.

Por fim, os resultados obtidos reforçam que a avaliação integrada das exposições ambientais representa uma necessidade crescente diante da intensificação das mudanças climáticas e da urbanização global. Nesse cenário, o SEES apresenta potencial para contribuir não apenas para o avanço da pesquisa científica em saúde ambiental e dermatologia, mas também para o desenvolvimento de estratégias preventivas e políticas públicas voltadas à redução da vulnerabilidade ambiental e à proteção da saúde humana ao longo do século XXI.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS GERAL

BAUDOUIN, C.; CHARVERON, M.; TARROUX, R.; GALL, Y. Environmental pollutants and skin cancer. **Cell Biology and Toxicology**, v. 18, p. 341–348, 2002.

CHANG, D. Y. Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP. **European Journal of Operational Research,** v. 95, n. 3, p. 649-655, 1996. DOI: 10.1016/0377-2217(95)00300-2.

CHANG, N.; FENG, R.; ZHIQIANG, G.; GAO, W. Skin cancer incidence is Altoly associated with ultraviolet-B radiation history. **International Journal of Hygiene and Environmental Health**, v. 213, n. 5, p. 359-368, 2010.

CHEN, J.; LIU, Y.; ZHAO, Z.; QIU, J. Oxidative stress in the skin: Impact and related protection. **International Journal of Cosmetic Science**, v. 43, n. 5, p. 495–509, 2021. DOI: 10.1111/ics.12728.

CORRÊA, M. P.; MARCIANO, A. G.; CARVALHO, V. S. B.; SOUZA, P. M. B.; RIPPER, J. S. C.; ROY, 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.

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.

FERRARA, F.; PAMBIANCHI, E.; WOODBY, B.; MESSANO, N.; THERRIEN, J.-P.; PECORELLI, A.; CANELLA, R.; VALACCHI, G. Evaluating the effect of ozone in UV induced skin damage. **Toxicology Letters**, v. 338, p. 40-50, 2021.

FITOUSSI, R.; FAURE, M.-O.; BEAUCHEF, G.; ACHARD, S. Human skin responses to environmental pollutants: A review of current scientific models. **Environmental Pollution**, v. 306, p. 119316, 2022. DOI: 10.1016/j.envpol.2022.119316.

HOFMANN, E.; SCHWARZ, A.; FINK, J.; KAMOLZ, L.-P.; KOTZBECK, P. Modelling the complexity of human skin in vitro. **Biomedicines**, v. 11, n. 3, p. 794, 2023. DOI: 10.3390/biomedicines11030794.

INSTITUTO NACIONAL DE CÂNCER (Brasil). **Estimativa 2026: incidência de câncer no Brasil**. Rio de Janeiro: INCA, 2026. 168 p. Disponível em: https://ninho.inca.gov.br/jspui/handle/123456789/17914.

IPCC, 2022: **Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.

KRUTMANN, J.; BOULOC, A.; SORE, G.; BERNARD, B. A.; PASSERON, T. The skin aging exposome. **Journal of Dermatological Science**, v. 85, n. 3, p. 152-161, 2017.

KRUTMANN, J.; SCHIKOWSKI, T.; MORITA, A.; BERNEBURG, M. Environmentally-induced (extrinsic) skin aging: Exposomal factors and underlying mechanisms. **Journal of Investigative Dermatology**, v. 141, n. 4, Suppl., p. 1096–1103, 2021. DOI: 10.1016/j.jid.2020.12.011.

KURVA, A.; KORIKANI, M.; MOHAN, V.; KANCHA, R. K. Skin cancer. In: **Biomedical Aspects of Solid Cancers**. [S.l.]: Springer, 2024. p. 235–252. DOI: 10.1007/978-981-97-1802-3_21.

MARROT, L. Pollution and Sun Exposure: A Deleterious Synergy. Mechanisms and Opportunities for Skin Protection. **Current Medicinal Chemistry**, v. 25, p. 5469-5486, 2018.

RITTIÉ, L.; FISHER, G. J. Natural and sun-induced aging of human skin. **Cold Spring Harbor Perspectives in Medicine**, v. 5, n. 1, p. a015370, 2015.

SÖZENER, Z. C.; CEVHERTAS, L.; NADEAU, K.; AKDIS, M.; AKDIS, C. A. Environmental factors in epithelial barrier dysfunction. **Clinical Reviews in Allergy & Immunology**, v. 58, n. 2, p. 1517–1528, 2020. DOI: 10.1007/s12016-020-08789-w.

WALKER, M. Human skin through the ages. **International Journal of Pharmaceutics**, v. 622, p. 121850, 2022. DOI: 10.1016/j.ijpharm.2022.121850.

XU, F.; LU, T. J.; SEFDEN, K. A. Biothermomechanics of skin tissues. **Journal of the Mechanics and Physics of Solids**, v. 56, n. 5, p. 1852-1884, 2008.

YAMAMOTO, A. L. C.; CORRÉA, M. P.; TORRES, R. R.; MARTINS, F. B.; GODIN BEEKMANN, S. Projected changes in ultraviolet index and UV doses over the twenty-first century: impacts of ozone and aerosols from CMIP6. **Photochemical & Photobiological Sciences**, 2024.

ZHAO, Q.; LIAN, Z.; LAI, D. Thermal comfort models and their developments: A review. **Energy and Built Environment**, v. 2, n.1, p. 21-33, 2021.