

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS E DA SAÚDE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS

PERICLES VALE ALVES

**UMA ANÁLISE INTEGRADA DA RADIAÇÃO UV, DAS CARACTERÍSTICAS
CUTÂNEAS, DOS HÁBITOS DE FOTOEXPOSIÇÃO E DA VULNERABILIDADE
SOCIOECONÔMICA NO SUL DO AMAZONAS**

SÃO CARLOS, SP

2025

PERICLES VALE ALVES

**UMA ANÁLISE INTEGRADA DA RADIAÇÃO UV, DAS CARACTERÍSTICAS
CUTÂNEAS, DOS HÁBITOS DE FOTOEXPOSIÇÃO E DA VULNERABILIDADE
SOCIOECONÔMICA NO SUL DO AMAZONAS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais (PPGCAm) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCAr), *Campus* São Carlos, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciências Ambientais.

Linha de pesquisa: Gestão de paisagens e geociências

Orientador: Prof. Dr. Vandoir Bourscheidt

**SÃO CARLOS, SP
2025**

Alves, Pericles Vale

Uma análise integrada da radiação UV, das características cutâneas, dos hábitos de fotoexposição e da vulnerabilidade socioeconômica no Sul do Amazonas / Pericles Vale Alves -- 2025.
168f.

Tese de Doutorado - Universidade Federal de São Carlos, campus São Carlos, São Carlos

Orientador (a): Vandoir Bourscheidt

Banca Examinadora: Vandoir Bourscheidt, Damaris

Kirsch Pinheiro, Rodrigo Martins Moreira, Mônica Nunes de Souza Santos, Marcos André Braz Vaz

Bibliografia

1. Radiação ultravioleta. 2. Sensoriamento remoto. 3. Saúde pública. I. Alves, Pericles Vale. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática (SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Arildo Martins - CRB/8 7180



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Biológicas e da Saúde
Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais

Folha de Aprovação

Defesa de Tese de Doutorado do candidato Pericles Vale Alves, realizada em 28/04/2025.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Vandoir Bourscheidt (UFSCar)

Profa. Dra. Damaris Kirsch Pinheiro (UFSCar)

Prof. Dr. Rodrigo Martins Moreira (UNIR)

Profa. Dra. Mônica Nunes de Souza Santos (UEA)

Prof. Dr. Marcos André Braz Vaz (UFSC)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais.

*Dedico esta tese aos meus pais, Paulo (in memoriam) e Iraci, por
todo o amor, orações, valores e incentivo que sempre me
ofertaram.*

*À minha esposa, Vanessa, pelo constante apoio nesta jornada.
E aos meus filhos, Lucas e Julia, razão maior da minha
esperança e inspiração diária.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, pois sem Ele nada podemos fazer.

Agradeço aos meus pais pelo incentivo ao longo de toda minha jornada acadêmica, esta que começa lá no pré-escolar e culmina aqui, no doutorado.

Agradeço à minha família, que, por diversas vezes, precisou compreender e aceitar minha ausência, mas que, sempre que possível, esteve ao meu lado nesta jornada.

Agradeço a minha irmã Iracilane pelo apoio e energias positivas que contribuíram para o sucesso deste trabalho.

Agradeço ao meu orientador, Vandoir, sempre paciente, compreensivo e aberto ao diálogo. Orientou-me com maestria, incentivando-me continuamente e acreditando no meu potencial.

Agradeço a cada professor do PPGCAm que tive a oportunidade de conhecer e com quem aprendi ao longo do doutorado.

Agradeço ao secretário do PPGCAm, Vinícius, excelente profissional, sempre atento e comunicando os prazos, além de prestativo diante de nossas demandas.

Agradeço aos membros das minhas bancas de qualificação e defesa pelas valiosas contribuições.

Agradeço à minha amiga Regiane, única colega de turma que cheguei a conhecer pessoalmente durante o doutorado.

Agradeço também aos amigos Adalcir e Dalton, colegas da UFAM, que estiveram presentes nesta jornada ao longo desses quatro anos.

Agradeço ao professor Amarino pela preparação para a prova de proficiência e pelas revisões dos meus textos acadêmicos em inglês.

Agradeço ao meu amigo Luís Octávio por sua ajuda com os códigos em Python. Com o repasse dos seus conhecimentos, hoje consigo avançar de forma autônoma nessa linguagem.

Agradeço à minha amiga Paula Regina, que recentemente defendeu seu doutorado e gentilmente me convidou a colaborar com ela em publicações envolvendo temas como Mudanças Climáticas e Educação em Saúde Planetária. Sou inteiramente grato por essa parceria, que tem gerado excelentes frutos.

Agradeço ao professor Dr. Marcos Moura, da Universidade Federal de Alagoas, que gentilmente me convidou a colaborar em algumas publicações.

Agradeço também ao professor Dr. Carlos Querino, pelo convite para contribuir em uma de suas publicações.

Agradeço ainda ao meu amigo Xisto Tavares, que, no início do doutorado, gentilmente me ofereceu um espaço em sua residência para que eu pudesse acompanhar as aulas, que até então ocorriam de forma remota.

Agradeço aos meus sogros, Raimundo e Eudira, que também foram essenciais durante essa jornada.

Não poderia deixar de agradecer às Secretarias Municipais de Saúde de Manicoré, Novo Aripuanã e Apuí que, por meio da senhora Maria Adriana, do senhor Marcelo Benlolo e da senhora Lexisandra — que à época conduziam as respectivas secretarias — firmaram parceria com esta pesquisa, cedendo dados fundamentais para o êxito deste estudo.

Agradeço também ao senhor Neto Carvalho, pelo apoio e pela logística durante minha estada em Novo Aripuanã, bem como ao professor Gilmar, que igualmente viabilizou minha acomodação em Apuí.

Agradeço à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas — FAPEAM pelo apoio concedido por meio da promoção da qualificação, conforme o Edital n.º 012/2021 — POSGFE, com a concessão de bolsa de doutorado no período de dezembro de 2021 a março de 2025.

Agradeço à Universidade Federal do Amazonas (UFAM) pela autorização do meu afastamento para cursar o Doutorado no Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais da Universidade Federal de São Carlos — UFSCar (São Carlos, SP), no período de 01/04/2021 a 31/03/2025.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

*“A educação não transforma o mundo. A
educação muda as pessoas. Pessoas
transformam o mundo.” (Paulo Freire)*

RESUMO

Alves, Péricles Vale. **Uma análise integrada da radiação UV, das características cutâneas, dos hábitos de fotoexposição e da vulnerabilidade socioeconômica no sul do Amazonas.** 2025. 168p. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais) – Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, Centro de Ciências Biológicas e da Saúde, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, São Carlos, SP, 2025.

Introdução: A radiação ultravioleta (UV) constitui um importante fator de risco ambiental à saúde humana, especialmente em regiões tropicais, onde os níveis de exposição tendem a ser elevados ao longo do ano. Na Amazônia brasileira, a ausência de estações de monitoramento em superfície e a escassez de estudos integrados sobre os efeitos da radiação UV em populações vulneráveis representam lacunas críticas para a formulação de políticas públicas. Esta tese propôs uma abordagem interdisciplinar que integra dados atmosféricos, fotobiológicos e sociais para investigar a exposição à radiação UV e sua relação com a propensão ao câncer de pele no sul do estado do Amazonas. **Objetivo:** Descrever as variações sazonais, tendências e correlações da radiação ultravioleta solar, assim como a propensão ao câncer de pele na região. **Materiais e Métodos:** A pesquisa baseou-se na análise de dados derivados de sensoriamento remoto (OMI/Aura e CAMS), abrangendo variáveis como irradiância UV, Índice UV (UVI), espessura óptica das nuvens (COT), coluna total de ozônio (TOC), vapor d'água (TCWV), material particulado (PM_{2.5} e PM₁₀) e profundidade óptica dos aerossóis (AOD), com séries temporais entre 2005 e 2022. Além disso, foram analisados dados de inquérito domiciliar realizado em 2022, obtidos junto às secretarias de saúde de Manicoré, Novo Aripuanã e Apuí, contemplando fototipos, hábitos de exposição solar, práticas de fotoproteção e indicadores de vulnerabilidade socioeconômica. **Resultados:** Os principais achados indicaram que o UVI apresenta padrão sazonal bem definido, com níveis de riscos classificados como “muito altos” e “extremos” durante todo o ano. As variáveis atmosféricas que têm maior impacto sobre o UVI são o TCWV, AOD e TOC. Tendências significativas de aumento nas irradiâncias UVA foram observadas, associadas à redução da cobertura de nuvens. A predominância de fototipos III a V na população estudada não se traduziu em práticas eficazes de fotoproteção, especialmente entre indivíduos em situação de vulnerabilidade socioeconômica, os quais apresentaram maior propensão à exposição prolongada ao sol e menor uso de protetor solar. A associação estatisticamente significativa entre vulnerabilidade social e baixa adesão à fotoproteção foi confirmada por meio do teste do qui-quadrado e da *Odds Ratio* (2,28). **Conclusões:** Conclui-se que os fatores atmosféricos, as condições socioeconômicas e os comportamentos individuais atuam de forma interdependente na exposição à radiação UV e na susceptibilidade ao câncer de pele. A ausência de monitoramento em superfície, aliada à escassez de dados clínicos e socioepidemiológicos integrados, compromete o enfrentamento dessa problemática na Amazônia. Recomenda-se a ampliação de campanhas de educação em saúde, a incorporação da escala de Fitzpatrick nos levantamentos populacionais e o fortalecimento das redes de diagnóstico precoce em áreas remotas, a fim de mitigar os efeitos cumulativos da radiação solar em populações vulneráveis.

Palavras-chave: Fotoexposição, Escala de Fitzpatrick, Desigualdade em Saúde, Câncer de Pele, Sensoriamento Remoto.

ABSTRACT

Alves, Péricles Vale. *An integrated analysis of UV radiation, skin characteristics, photoexposure habits, and socioeconomic vulnerability in southern Amazonas*. 2025. 168p. Thesis (Ph.D. in Environmental Sciences) – Federal University of São Carlos – UFSCar, Center for Biological and Health Sciences, Graduate Program in Environmental Sciences, São Carlos, SP, 2025.

Introduction: Ultraviolet (UV) radiation is a major environmental health risk factor, particularly in tropical regions, where exposure levels tend to remain high throughout the year. In the Brazilian Amazon, the lack of surface monitoring stations and the scarcity of integrated studies on the effects of UV radiation on vulnerable populations represent critical gaps for the development of effective public policies. This thesis proposed an interdisciplinary approach integrating atmospheric, photobiological, and social data to investigate UV exposure and its relationship with skin cancer susceptibility in the southern region of the state of Amazonas. **Objective:** To describe seasonal variations, trends, and correlations of solar ultraviolet radiation, as well as its association with skin cancer susceptibility in the region. **Materials and Methods:** The study was based on the analysis of remotely sensed data (OMI/Aura and CAMS), including variables such as UV irradiance, Ultraviolet Index (UVI), cloud optical thickness (COT), total ozone column (TOC), total column water vapor (TCWV), particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), and aerosol optical depth (AOD), covering the 2005–2022 period. Additionally, household survey data collected by local municipal health department in 2022 were analyzed, encompassing skin phototypes, sun exposure habits, photoprotection practices, and socioeconomic vulnerability indicators. **Results:** The findings indicated that the UVI follows a well-defined seasonal pattern, with risk levels classified as “very high” and “extreme” throughout the year. TCWV, AOD, and TOC were identified as the most influential factors on UVI. Statistically significant upward trends in UVA irradiance were observed, associated with reductions in cloud cover. The predominance of phototypes III to V in the studied population did not result in effective photoprotection practices, particularly among individuals in socioeconomic vulnerability, who showed a greater tendency toward prolonged sun exposure and lower sunscreen usage. A statistically significant association between socioeconomic vulnerability and low adherence to photoprotection was confirmed through the chi-square test and an Odds Ratio of 2.28. **Conclusions:** Atmospheric factors, socioeconomic conditions, and individual behaviors interact in a mutually reinforcing manner in UV exposure and skin cancer susceptibility. The absence of surface monitoring, combined with limited clinical and socioepidemiological data, hinders the effective response to this issue in the Amazon. The findings underscore the need to expand health education campaigns, incorporate the Fitzpatrick scale into national population surveys, and strengthen early diagnosis networks in remote areas to mitigate the cumulative effects of UV radiation on vulnerable populations.

Keywords: Photoexposure, Fitzpatrick Scale, Health Inequality, Skin Cancer, Remote Sensing.

RESUMEN

Alves, Péricles Vale. *Un análisis integrado de la radiación UV, las características cutáneas, los hábitos de fotoexposición y la vulnerabilidad socioeconómica en el sur de Amazonas*. 2025. 168p. Tesis (Doctorado en Ciencias Ambientales) – Universidad Federal de São Carlos – UFSCar, Centro de Ciencias Biológicas y de la Salud, Programa de Posgrado en Ciencias Ambientales, São Carlos, SP, 2025.

Introducción: La radiación ultravioleta (UV) constituye un importante factor de riesgo ambiental para la salud humana, especialmente en regiones tropicales, donde los niveles de exposición tienden a mantenerse elevados durante todo el año. En la Amazonía brasileña, la ausencia de estaciones de monitoreo en superficie y la escasez de estudios integrados sobre los efectos de la radiación UV en poblaciones vulnerables representan vacíos críticos para la formulación de políticas públicas eficaces. Esta tesis propuso un enfoque interdisciplinario que integra datos atmosféricos, fotobiológicos y sociales para investigar la exposición a la radiación UV y su relación con la propensión al cáncer de piel en la región sur del estado de Amazonas. **Objetivo:** Describir las variaciones estacionales, las tendencias y las correlaciones de la radiación ultravioleta solar y su asociación con la propensión al cáncer de piel en la región. **Materiales y Métodos:** La investigación se basó en el análisis de datos obtenidos mediante teledetección (OMI/Aura y CAMS), incluyendo variables como irradiancia UV, Índice Ultravioleta (UVI), espesor óptico de nubes (COT), columna total de ozono (TOC), vapor de agua total (TCWV), material particulado (PM_{2.5} y PM₁₀) y profundidad óptica de los aerosoles (AOD), abarcando el período de 2005 a 2022. Además, se analizaron datos poblacionales obtenidos mediante encuestas domiciliarias realizadas en 2022, que contemplaron fototipos cutáneos, hábitos de exposición solar, prácticas de fotoprotección e indicadores de vulnerabilidad socioeconómica. **Resultados:** Los principales hallazgos indicaron que el UVI presenta un patrón estacional bien definido, con niveles de riesgo clasificados como “muy altos” y “extremos” durante todo el año. Las variables con mayor influencia sobre el UVI fueron el TCWV, la AOD y la TOC. Se observaron tendencias significativas de aumento en la irradiancia UVA, asociadas a la reducción de la cobertura nubosa. La predominancia de fototipos III a V en la población estudiada no se tradujo en prácticas eficaces de fotoprotección, especialmente entre individuos en situación de vulnerabilidad socioeconómica, quienes presentaron mayor propensión a la exposición solar prolongada y menor uso de protector solar. La asociación estadísticamente significativa entre vulnerabilidad social y baja adherencia a la fotoprotección fue confirmada mediante la prueba de chi-cuadrado y una Razón de Probabilidades (Odds Ratio) de 2,28. **Conclusiones:** Los factores atmosféricos, las condiciones socioeconómicas y los comportamientos individuales interactúan de forma interdependiente en la exposición a la radiación UV y en la susceptibilidad al cáncer de piel. La ausencia de monitoreo en superficie, junto con la limitada disponibilidad de datos clínicos y socioepidemiológicos integrados, dificulta el enfrentamiento de esta problemática en la Amazonía. Se recomienda ampliar las campañas de educación en salud, incorporar la escala de Fitzpatrick en los censos poblacionales nacionales y fortalecer las redes de diagnóstico precoz en áreas remotas, con el fin de mitigar los efectos acumulativos de la radiación solar en poblaciones vulnerables.

Palabras clave: Fotoexposición, Escala de Fototipos de Fitzpatrick, Desigualdad en Salud, Cáncer de Piel, Teledetección.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 - Espectros de ação para diversos efeitos fotobiológicos em função do λ . Fonte. Schmalwieser et al., (2022).	31
Figura 3-1 - Localização da área de estudo, mostrando a distribuição espacial do uso e cobertura da terra na região, com ênfase nas áreas urbanas.	61
Figura 3-2 - Dinâmica da irradiância UV no sul do Amazonas entre 2005 e 2022. Os painéis (a), (b), (c) e (d) apresentam as médias mensais multianuais das irradiâncias UV para os comprimentos de onda de 305 nm, 310 nm, 324 nm e 380 nm, respectivamente, com barras de erro indicando a variabilidade mensal.	70
Figura 3-3 - Variações sazonais da Coluna Total de Ozônio (TOC), da Espessura Óptica das Nuvens (COT) e da situação crítica ($TOC \times COT$) no sul do Amazonas entre 2005 e 2022. O painel (a) apresenta as médias mensais multianuais de TOC (em Unidades Dobson, DU), enquanto o painel (b) mostra as médias mensais multianuais de COT. O painel (c) exibe a situação crítica, calculada como o produto entre TOC e COT. As barras de erro indicam a variabilidade mensal.	72
Figura 3-4 - Mapas espaciais das tendências de irradiância UV no sul do Amazonas entre 2005 e 2022, para diferentes comprimentos de onda: (a) 305 nm, (b) 310 nm, (c) 324 nm e (d) 380 nm. As cores representam a magnitude das tendências (em $mW \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1} \cdot ano^{-1}$), com áreas em azul indicando tendências negativas e áreas em vermelho indicando tendências positivas. Os pontos pretos destacam os pixels cujas tendências são estatisticamente significativas ($p < 0,05$).	73
Figura 3-5 - Mapas espaciais das tendências anuais das variáveis atmosféricas no sul do Amazonas entre 2005 e 2022. Os painéis representam as tendências em: (a) Coluna Total de Ozônio (DU), (b) Profundidade Óptica Total de Aerossóis (550 nm), (c) Coluna Total de Vapor d'Água ($kg \cdot m^{-2}$) e (d) Espessura Óptica das Nuvens. As cores indicam a magnitude das tendências, com tons quentes representando tendências positivas e tons frios representando tendências negativas. No painel (d), os pontos pretos destacam os pixels cujas tendências são estatisticamente significativas ($p < 0,05$).	74
Figura 3-6 - Distribuição espacial da correlação linear de Pearson entre as irradiâncias UV (em comprimentos de onda específicos) e a concentração de ozônio durante o período de 2005 a 2022. Os painéis (a), (b), (c) e (d) representam as correlações para os comprimentos de onda de 305 nm, 310 nm, 324 nm e 380 nm, respectivamente. A escala de cores indica a intensidade e a direção da correlação, com tonalidades azuis representando correlações negativas e tonalidades vermelhas representando correlações positivas. Os pontos pretos indicam os locais onde as correlações são estatisticamente significativas ($p < 0,05$).	76
Figura 3-7 - Distribuição espacial da correlação linear de Pearson entre as irradiâncias UV (em comprimentos de onda específicos) e a Espessura Óptica das Nuvens durante o período de 2005 a 2022. Os painéis (a), (b), (c) e (d) representam as correlações para os comprimentos de onda de 305 nm, 310 nm, 324 nm e 380 nm, respectivamente. A escala de cores indica a intensidade e a direção da correlação, com tonalidades azuis representando correlações negativas e tonalidades vermelhas representando correlações positivas. Os pontos pretos indicam os locais onde as correlações são estatisticamente significativas ($p < 0,05$).	77

Figura 3-8 - Variabilidade das médias anuais da Espessura Óptica das Nuvens e das irradiâncias em 324 e 380 nm agrupadas por município a cada seis anos.	78
Figura 4-1 - Localização da área de estudo, com destaque para os municípios da região geográfica imediata de Manicoré, onde a coleta de dados foi realizada.	93
Figura 4-2 - Descrição dos fototipos cutâneos e pessoas expostas ao sol entre 10 e 15 horas, considerando os dados fornecidos pelas Secretarias Municipais de Saúde dos municípios de Manicoré, Apuí e Novo Aripuanã. Em (a) Distribuição percentual dos fototipos; (b) Distribuição percentual por fototipo das pessoas expostas à radiação solar.	96
Figura 4-3 - Distribuição percentual, por fototipo, do intervalo de tempo de exposição ao sol em (a) e os cuidados e os cuidados de fotoproteção em (b). Destaca-se que o termo “Ambos” refere-se à adoção combinada de práticas de fotoproteção, englobando o uso de vestimentas protetoras (como camisas, chapéus e óculos escuros), associadas ao uso de filtro de proteção solar (FPS).	98
Figura 4-4 - Distribuição da amostra conforme intervalos de tempo de exposição solar e renda familiar bruta. Os valores 1, 2 e 3 no eixo Tempo de exposição ao Sol representam os intervalos de tempo de exposição solar até 15 minutos, entre 15 e 30 minutos e por mais de 30 minutos, respectivamente. Enquanto o eixo Renda Familiar Bruta indica em: 1 (renda menor que um salário-mínimo), 2 (renda igual a um salário-mínimo), 3 (renda de um até um e meio salário-mínimo), 4 (renda de um e meio a três salário-mínimo), 5 (renda de três a cinco salário-mínimo) e 6 (renda maior que cinco salário-mínimo). O eixo Z exibe a frequência de indivíduos em cada combinação de tempo de exposição e faixa de renda.	99
Figura 4-5 - Distribuição percentual de pessoas em situação de vulnerabilidade socioeconômica e suas práticas de fotoproteção. O gráfico ilustra a relação entre o nível de proteção solar adotado e a condição socioeconômica, destacando o comportamento da população vulnerável em termos de exposição ao sol e uso de medidas preventivas, como o uso de protetor solar, roupas adequadas e chapéus.	100
Figura 5-1 - Localização da área de estudo na microrregião do Madeira, sul do Amazonas, Brasil. O mapa principal apresenta os municípios analisados (Manicoré, Novo Aripuanã e Apuí), com a delimitação municipal destacada em branco. A miniatura no canto superior esquerdo mostra a localização da região dentro do Brasil. À direita, imagens de alta resolução detalham os pontos de coleta nos respectivos municípios, evidenciando a distribuição espacial das áreas urbanas e sua relação com os corpos hídricos.	117
Figura 5-2 - Variabilidade mensal interanual (2005 a 2022) e ciclo anual, onde de (a) até (c) estão as concentrações de $PM_{2.5}$, PM_{10} e AOD, representadas em escala logarítmica para melhor visualização dos resultados; de (d) a (f), respectivamente, a coluna total de vapor de água, espessura óptica das nuvens e a coluna total de ozônio; e em (g), (h) e (i) a Dose Eritemal Diária, Taxa de Dose Eritemal e o Índice UV.	129
Figura 5-3 - Séries temporais das variáveis atmosféricas analisadas entre 2005 e 2022. A linha azul clara representa os valores mensais das variáveis, enquanto a linha azul escura indica a tendência suavizada ao longo do tempo. As linhas vermelhas tracejadas correspondem às tendências lineares ajustadas para cada variável. (a) Concentração de $PM_{2.5}$ ($\mu g/m^3$); (b) Concentração de PM_{10} ($\mu g/m^3$); (c) Profundidade óptica do aerossol a 550 nm (AOD_{550}). Os painéis de (a) até (c) estão representados em escala logarítmica para melhor visualização dos resultados; (d) Precipitação total na coluna (TCWV, kg/m^2); (e) Espessura óptica das nuvens (COT); (f) Coluna total de ozônio	

(TOC, DU); (g) Dose eritemal diária (EDD, J/m²); (h) Taxa de dose eritemal (EDR, mW/m²); (i) Índice UV (UVI). As taxas de variação anual e a significância estatística das tendências são apresentadas em cada painel..... 131

Figura 5-4 - Distribuição dos valores SHAP para as variáveis preditoras do modelo Random Forest na estimativa do Índice de Radiação Ultravioleta (UVI). Cada ponto representa um valor SHAP correspondente a uma observação no conjunto de teste, indicando o impacto de cada variável na previsão do modelo. A escala de cores representa os valores normalizados das variáveis, onde azul indica valores mais baixos e vermelho valores mais altos. Valores SHAP positivos contribuem para o aumento da predição do UVI, enquanto valores negativos reduzem sua estimativa..... 133

Figura 5-5 - Distribuição de densidade dos valores individuais do Índice de Suscetibilidade (IS), calculado com base na mediana dos z-scores de variáveis socioeconômicas, comportamentais e biológicas. As cores azul, laranja, verde e vermelho, representam, respectivamente, as faixas classificatórias: baixa (IS < -0,5), moderada (-0,5 ≤ IS ≤ 0), alta (0 < IS ≤ 0,5) e extrema (IS > 0,5)..... 134

Figura 5-6 - Percentual de indivíduos classificados em quatro faixas de suscetibilidade com base na mediana dos z-scores padronizados: baixa (IS < -0,5), moderada (-0,5 ≤ IS ≤ 0), alta (0 < IS ≤ 0,5) e extrema (IS > 0,5)..... 135

Figura 5-7 - Distribuição percentual das contribuições das oito variáveis analisadas (fototipo, tempo de exposição, cuidados, renda, escolaridade, densidade domiciliar, saúde e residência) em cada faixa de suscetibilidade: (a) baixa, (b) moderada, (c) alta e (d) extrema. Valores baseados na média dos z-scores absolutos e convertidos proporcionalmente por grupo. Destaques visuais foram atribuídos às variáveis que, somadas, representam ao menos 70% da composição em cada faixa. 136

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	19
1.2	PROBLEMÁTICA	20
1.3	JUSTIFICATIVA	22
1.4	OBJETIVOS	24
1.4.1	GERAL	24
1.4.2	ESPECÍFICOS	24
1.5	PRESSUPOSTOS DA PESQUISA	24
1.6	REFERÊNCIAS DO CAPÍTULO	24
2	UMA BREVE REVISÃO DA LITERATURA	29
2.1	FUNDAMENTOS DA RADIAÇÃO SOLAR ULTRAVIOLETA	29
2.1.1	RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA SOLAR E SUAS DERIVAÇÕES	29
2.1.2	FATORES QUE INFLUENCIAM A IRRADIÂNCIA ULTRAVIOLETA NA SUPERFÍCIE	33
2.2	IMPACTOS DA RADIAÇÃO UV NA SAÚDE E NA SOCIEDADE	38
2.2.1	EFEITOS BIOLÓGICOS DA RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA	39
2.3	FOTOTIPOS CUTÂNEOS E RESPOSTA À RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA	42
2.4	VULNERABILIDADE SOCIOECONÔMICA: ÍNDICES, DESIGUALDADES E IMPLICAÇÕES PARA A SAÚDE PÚBLICA	45
2.5	SENSORIAMENTO REMOTO: CONCEITOS, TECNOLOGIAS E APLICAÇÕES AMBIENTAIS	47
2.6	REFERÊNCIAS DO CAPÍTULO	50
3	VARIAÇÕES SAZONAIS E TENDÊNCIAS DA IRRADIÂNCIA ESPECTRAL SOLAR UV COM BASE EM DADOS DO OZONE MONITORING INSTRUMENT AO MEIO-DIA SOLAR NO SUL DO AMAZONAS, BRASIL	60
3.1	MATERIAIS E MÉTODOS	60
3.1.1	DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	60
3.1.2	INSTRUMENTOS	62
3.1.3	COLETA E PROCESSAMENTO DE DADOS	64
3.1.4	ANÁLISE ESTATÍSTICA	66
3.2	RESULTADOS	69
3.2.1	SAZONALIDADE DA IRRADIÂNCIA UV, OZÔNIO E NUVENS	69
3.2.2	TENDÊNCIAS NA IRRADIÂNCIA ULTRAVIOLETA SOLAR	73
3.2.3	TENDÊNCIAS NO OZÔNIO, AEROSSÓIS, VAPOR DE ÁGUA E NUVENS	73

3.2.4	CORRELAÇÕES ENTRE IRRADIÂNCIA UV, OZÔNIO E NUVENS	75
3.3	DISCUSSÃO	78
3.3.1	SAZONALIDADE DA IRRADIÂNCIA UV	78
3.3.2	SAZONALIDADE DO OZÔNIO	79
3.3.3	SAZONALIDADE DAS NUVENS	79
3.3.4	INTERPRETAÇÃO DAS TENDÊNCIAS E CORRELAÇÕES	80
3.3.5	POTENCIAIS IMPACTOS DO UVA	83
3.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	84
3.5	REFERÊNCIAS DO CAPÍTULO	85
4	FOTOTIPOS CUTÂNEOS, EXPOSIÇÃO À RADIAÇÃO UV E VULNERABILIDADE SOCIOECONÔMICA	92
4.1	MATERIAIS E MÉTODOS	92
4.1.1	DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	92
4.1.2	COLETA E TRATAMENTO DOS DADOS	94
4.1.3	ANÁLISE EXPLORATÓRIA E ESTATÍSTICA DOS DADOS	95
4.2	RESULTADOS	96
4.2.1	DESCRIÇÃO DOS FOTOTIPOS CUTÂNEOS	96
4.2.2	HÁBITOS DE EXPOSIÇÃO SOLAR	97
4.2.3	PRÁTICAS DE FOTOPROTEÇÃO E VULNERABILIDADE SOCIOECONÔMICA	98
4.3	DISCUSSÃO	101
4.3.1	DESCRIÇÃO DOS FOTOTIPOS	101
4.3.2	FATORES QUE INFLUENCIAM OS HÁBITOS DE EXPOSIÇÃO	103
4.3.3	PRÁTICAS DE FOTOPROTEÇÃO EM CONTEXTOS DE VULNERABILIDADE SOCIOECONÔMICA	106
4.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	109
4.5	REFERÊNCIAS DO CAPÍTULO	109
5	VARIABILIDADE DA RADIAÇÃO E SUSCETIBILIDADE AOS RISCOS ASSOCIADOS AO UV	116
5.1	MATERIAIS E MÉTODOS	117
5.1.1	DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	117
5.1.2	INSTRUMENTOS, COLETA E TRATAMENTO DOS DADOS	118
5.1.3	ANÁLISE EXPLORATÓRIA E ESTATÍSTICA	120
5.1.4	DESENVOLVIMENTO DO ÍNDICE DE SUSCETIBILIDADE AOS RISCOS ASSOCIADOS AO UV	122
5.2	RESULTADOS	128
5.2.1	VARIAÇÕES MENSAIS INTERANUAIS E CICLO ANUAL	128
5.2.2	TENDÊNCIAS ANUAIS	129

5.2.3	IMPORTÂNCIA DAS VARIÁVEIS ATMOSFÉRICAS NA MODULAÇÃO DO UVI	131
5.2.4	ÍNDICE DE SUSCETIBILIDADE AOS RISCOS ASSOCIADOS AO UV	133
5.3	DISCUSSÃO	138
5.3.1	PADRÕES MENSAIS INTERANUAIS E CICLO ANUAL DE VARIÁVEIS ATMOSFÉRICAS	138
5.3.2	PADRÕES MENSAIS INTERANUAIS E CICLO ANUAL DO ÍNDICE UV	140
5.3.3	ANÁLISE DE TENDÊNCIAS	141
5.3.4	ÍNDICE DE SUSCETIBILIDADE AOS RISCOS ASSOCIADOS AO UV	149
5.3.5	VALIDAÇÃO DO ÍNDICE DE SUSCETIBILIDADE	150
5.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	151
5.5	REFERÊNCIAS DO CAPÍTULO	153
6	CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS	163

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO

Neste primeiro capítulo apresenta-se uma contextualização sobre a radiação solar e suas bandas espectrais, com destaque para UVA e UVB e seus efeitos nocivos. Dá-se ênfase a escala de Fitzpatrick para a classificação dos fototipos cutâneos e a importância da fotoproteção para a saúde pública. Aborda-se também a problemática que motiva esta pesquisa, a qual envolve câncer de pele, desafios enfrentados por populações amazônicas e a falta de monitoramento do UV em superfície na região. Com base nesses fatores, justifica-se o uso de dados de satélite para monitoramento do UV em áreas remotas. Por fim, são apresentados os objetivos e as hipóteses que norteiam a presente pesquisa.

Ademais, a abordagem metodológica desta pesquisa — que inclui a integração de métodos estatísticos rigorosos e uma análise detalhada de tendências — reforça a confiabilidade dos resultados e destaca a relevância deste trabalho para o avanço da compreensão sobre a interação entre a composição atmosférica e a radiação UV na região amazônica.

1.1 Contextualização

A radiação solar abrange bandas espectrais no infravermelho (IR, $\lambda > 700$ nm), no visível (VIS, $400 < \lambda \leq 700$ nm) e no ultravioleta (UV, $100 \leq \lambda \leq 400$ nm), sendo fundamental para a vida na Terra ao fornecer energia essencial para processos como a fotossíntese e a regulação climática (Liou, 2002; Häder D.-P. et al., 2007; Kumar & Häder, 2012; Gómez J. M. et al., 2018; Bornman J. F. et al., 2019; Gómez J. M., 2024). A radiação UV que atinge a superfície terrestre representa menos de 10 % da radiação solar total, em que as variações diárias e sazonais que ocorrem no UV são influenciadas por fatores como a espessura da camada de ozônio, latitude, altitude, cobertura de nuvens, ângulo zenital solar e poluição atmosférica (Kerr J. B., 2005; Lopo A. B. et al., 2013; Aun et al., 2019). Assim, cerca de 90 a 95 % de UV que alcança a superfície está entre 315 e 400 nm (UVA) e aproximadamente 5 % entre 280 e 315 nm (UVB). A radiação entre 100 e 280 nm (UVC) é completamente absorvida na estratosfera e não atinge a superfície (Bais A. F. et al., 2019; Parisi et al., 2021; Bernhard G. H. et al., 2023).

Embora o UVA seja menos energético que o UVB, sua maior capacidade de penetração na pele – atingindo camadas mais profundas como a derme, contribui para alterações estruturais e funcionais da pele a longo prazo (Sola & Lorente, 2015; Saucedo et al., 2020). No entanto, sua menor interação com o DNA faz com que ela tenha menor envolvimento direto na carcinogênese da pele, embora reações de fotossensibilização possam induzir danos indiretos ao DNA, o que inclui a quebra de cadeia, interferências nos mecanismos de reparação, entre outros (Hussein, 2005; Ullrich, 2005; Girard et al., 2011; Halliday et al., 2011; Sage et al., 2012; Al-Sadek & Yusuf, 2024). Por outro lado, o UVB afeta principalmente a epiderme, podendo também atingir a derme superior, sendo o principal responsável por queimaduras solares e, devido à sua alta absorção pelo DNA genômico, por aumentar significativamente o risco de câncer de pele (Ghissassi et al., 2009; Damian et al., 2011; Young et al., 2017; Eleftheratos K. et al., 2020).

1.2 Problemática

De modo geral, pesquisas na área da saúde evidenciam que a radiação UV afeta a saúde humana de maneiras tanto prejudiciais (Saucedo et al., 2020) quanto benéficas (Juzeniene & Moan, 2012), em que, além dos fatores ambientais e comportamentais, fatores genéticos, como o fototipo cutâneo, influenciam a sensibilidade à radiação UV (Juzeniene et al., 2011; Al-Sadek & Yusuf, 2024). O *Global Cancer Observatory* através da *International Agency for Research on Cancer* (IARC), estimou para o ano de 2020, cerca de 1,2 milhões de novos casos de câncer de pele não melanoma (NMSC, sigla do inglês *Non-melanoma Skin Cancer*) no mundo (Ferlay et al., 2021; Sung et al., 2021). No Brasil, segundo estimativas do Instituto Nacional do Câncer (INCA) para o triênio de 2020 a 2022, o NMSC é o câncer mais comum entre todos, com cerca de 177 mil novos casos esperados por ano, representando mais que 27 % entre todos os tumores malignos do corpo humano (INCA, 2019). Para o triênio 2023 a 2025, o INCA estima 221 mil casos novos, 31,3 % de todos os outros casos de câncer (INCA, 2022).

O NMSC compreende um grupo de neoplasias originadas nas células da epiderme, exceto originados no melanócito, que são classificados como câncer de pele melanoma (MSC, sigla do inglês *Melanoma Skin Cancer*). Os tipos mais comuns de NMSC são o carcinoma basocelular (CBC), caracterizado por crescimento lento e baixa taxa de metástase, e o carcinoma espinocelular (CEC), que possui maior potencial invasivo e risco de disseminação para as diferentes partes do corpo. Embora o MSC seja menos frequente, trata-se da forma mais agressiva e letal, devido à sua

alta capacidade de produzir metástases em órgãos internos quando não diagnosticado precocemente (Hussein, 2005; Ferlay et al. 2021).

De acordo com o INCA, entre 1979 e 2022, foram registradas mais de 47 mil mortes por MSC no Brasil, com tendência de crescimento significativa, inclusive na Região Norte, historicamente menos assistida por políticas públicas de prevenção e diagnóstico precoce (Mélo et al., 2019; Silva et al., 2020; INCA, 2024). Nesse contexto, a escala de Fitzpatrick (FSPC, sigla do inglês *Fitzpatrick Skin Phototype Classification*) desponta como um instrumento simples, de baixo custo e clinicamente eficaz para estimar a sensibilidade cutânea à radiação UV com base na cor da pele, olhos, cabelos e na resposta ao sol. Sua incorporação em censos demográficos e inquéritos de saúde poderia permitir o mapeamento do perfil fotocutâneo da população brasileira, especialmente nas regiões de maior vulnerabilidade climática e social, como o Norte do país. Tal abordagem subsidiaria ações de vigilância epidemiológica, campanhas educativas e estratégias direcionadas de fotoproteção, contribuindo para a redução da incidência de câncer de pele a médio e longo prazo.

A FSPC avalia o potencial de cada indivíduo para se bronzear, bem como a sensibilidade e vermelhidão quando exposto a radiação solar, é uma classificação amplamente utilizada e internacionalmente aceita, sendo atualmente a principal referência para determinação de fototipos cutâneos (Fitzpatrick, 1988). A escala abrange seis fototipos distintos e, além de orientar a elaboração de protocolos para tratamento de fototerapia (Diffey et al., 1997; Young et al., 2017), fornece subsídios para campanhas anuais de prevenção ao câncer de pele, como o “Dezembro Laranja” promovido pela Sociedade Brasileira de Dermatologia (SBD, 2021). É importante salientar que essa classificação é, em certa medida, subjetiva, pois a sensibilidade da pele depende de fatores individuais, como hábitos de exposição, fatores genéticos, além das condições de saúde e alimentação (Hussein, 2005; Kennedy et al., 2021; Al-Sadek & Yusuf, 2024).

Pessoas com síndromes genéticas, como xeroderma pigmentoso, síndrome de Gorlin-Goltz, albinismo e a síndrome do nevo displásico têm maior suscetibilidade ao câncer de pele e, portanto, requerem cuidados especiais de fotoproteção (Nehal & Bichakjian, 2018). Embora indivíduos com tons de pele mais escuros tenham maior tolerância à exposição solar devido à presença de melanina, que absorve e dispersa a radiação ultravioleta, eles também podem desenvolver queimaduras solares em situações de altíssima exposição ao sol ou devido ao uso de medicamentos e tratamentos que tornam a pele mais sensível (Ghissassi et al., 2009). De modo geral, o uso de protetores solares, vestimentas adequadas, óculos escuros, chapéus, entre outras

formas de fotoproteção, pode promover uma defesa eficaz contra os efeitos nocivos da radiação solar, mesmo em situações de exposição prolongada à radiação UV (ICNIRP, 2004; Gies et al., 2018).

1.3 Justificativa

Dessa forma, para que especialistas em saúde pública possam orientar a população sobre o tempo seguro de exposição e os cuidados necessários para diferentes tipos de pele, é necessário, além do monitoramento contínuo da radiação UV, divulgar as medições de UV em tempo real (Blumthaler, 2018; Lucas et al., 2019; Vitt . et al., 2020). O índice UV é uma ferramenta essencial para a conscientização pública, visto que se trata de uma escala adimensional padronizada em cinco categorias: baixo (0-2), moderado (3-5), alto (6-7), muito alto (8-10) e extremo (11+) (WMO, 1998; WHO, 2002). No Brasil, o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) monitora e divulga esse índice em tempo real, embora a cobertura de monitoramento seja limitada basicamente às capitais (INPE, 2024). Porém, medir com precisão e de forma abrangente a radiação UV em superfície é um desafio significativo, uma vez que o alto custo, a necessidade de calibração e a manutenção regular dos equipamentos limitam severamente a disponibilidade de sensores espectrais de UV operando continuamente por longos períodos em estações meteorológicas em todo o mundo, especialmente em áreas remotas e de difícil acesso.

Na região Amazônica, por exemplo, medições de UV em solo são extremamente escassas, como relatado em apenas duas publicações, uma para a cidade de Humaitá no Amazonas (Alves et al., 2022) e outra para Santarém no Pará (Reis et al., 2022). Nessa região, muitas das populações dependem fortemente de atividades ao ar livre para sua subsistência, como a agricultura e a pesca, as quais expõem os indivíduos a longos períodos de exposição ao sol, o que aumenta significativamente o risco de danos à pele e outros problemas de saúde relacionados à radiação solar (Dantas et al., 2016; Franco et al., 2016; Modenese et al., 2018; Silva et al., 2020; Malinović-Milićević et al., 2022). Somado a isso, as populações enfrentam desafios socioeconômicos significativos, como o acesso limitado a serviços de saúde, educação e infraestrutura básica (Garnelo et al., 2020; Mesquita et al., 2020). Esses desafios agravam as questões socioambientais dessas comunidades, reduzindo a conscientização sobre os riscos da exposição ao sol e limitando o acesso a medidas adequadas de fotoproteção, como o uso de protetor solar, roupas apropriadas e

outros métodos essenciais de fotoproteção para mitigar os impactos da exposição prolongada à radiação UV (Costa et al., 2022).

Nesse sentido, instrumentos baseados em satélites que oferecem cobertura global diária, adequados para estudar as tendências globais de radiação UV, podem contribuir para a compreensão da complexa distribuição espacial e temporal do UV nessas áreas (Aun et al., 2019; Jebar et al., 2020; Vitt et al., 2020; Parisi et al., 2021; Malinović-Milićević et al., 2022; Reis et al., 2023). Por exemplo, Jebar et al. 2020 investigaram a influência das nuvens na exposição diária total à radiação UVA derivada do Instrumento de Monitoramento de Ozônio (OMI) em uma escala temporal de 12 anos em uma área do Hemisfério Sul. Reis et al. 2023 estudaram a variabilidade mensal e sazonal do Índice UV em Santarém, Pará, Brasil, usando dados do OMI e do GOME-2. Além destes, diversos estudos empregaram metodologias baseadas em dados de instrumentos embarcados em satélites (Weihs et al., 2008; Ialongo et al., 2011; Vitt et al., 2020; Silva et al., 2022).

A região sul do Amazonas, rica em biodiversidade e com condições climáticas particulares, representa um valioso laboratório natural para o estudo das interações entre o meio ambiente e suas populações. Porém, focar unicamente nas distribuições espaciais e temporais da radiação solar é uma exploração limitada frente ao vasto potencial de pesquisa que a região oferece. Ao considerar os setores econômico, social e ambiental, torna-se evidente a necessidade de uma investigação mais profunda. Assim, compreender a dinâmica das irradiâncias UV é fundamental; no entanto, é igualmente essencial avaliar a suscetibilidade da população aos efeitos adversos dessa radiação. Essa questão situa-se na interseção dos três pilares das Ciências Ambientais — o ambiental, o social e o econômico —, transcendendo as questões ambientais, sejam elas de origem natural ou antrópica, para abranger aspectos relacionados aos hábitos individuais de exposição solar, às práticas de fotoproteção e, especialmente, à influência das condições socioeconômicas sobre esses comportamentos (Frank & Berbet, 2017). Essa abordagem interdisciplinar, preconizada pelas Ciências Ambientais, tem o potencial de não apenas aprimorar a compreensão dos impactos da radiação solar na saúde humana, mas também direcionar ações preventivas e promover o bem-estar das comunidades amazônicas, integrando conhecimento científico a práticas acessíveis e eficazes.

1.4 Objetivos

Neste contexto, considerando que os municípios localizados no sul do Amazonas não possuem estações meteorológicas de superfície capazes de monitorar a radiação ultravioleta solar por períodos prolongados, nem estudos aprofundados sobre as condições socioeconômica e de fotoexposição, este estudo utilizou dados derivados de sensoriamento remoto e de inquéritos domiciliar com o objetivo de:

1.4.1 Geral

Descrever as variações sazonais, tendências e correlações da radiação ultravioleta solar e sua relação com a propensão ao câncer de pele na região.

1.4.2 Específicos

1. Analisar a variabilidade espaço-temporal da radiação ultravioleta solar;
2. Identificar, nas populações locais, os fototipos cutâneos, a condição socioeconômica e os hábitos de fotoexposição e fotoproteção;
3. Relacionar a vulnerabilidade socioeconômica aos hábitos de fotoproteção adotados pelas populações expostas à radiação ultravioleta solar.

1.5 Pressupostos da Pesquisa

Partindo dos objetivos traçados, este estudo assume os seguintes pressupostos:

- (i) a radiação ultravioleta solar na mesorregião sul do Amazonas apresenta variações significativas, influenciadas por fatores atmosféricos e sazonais;
- (ii) as populações locais, predominantemente compostas por indivíduos com fototipos mais elevados, não adotam práticas adequadas de fotoproteção, especialmente entre os grupos em situação de vulnerabilidade socioeconômica; e
- (iii) há uma relação direta entre vulnerabilidade socioeconômica e menor adesão a comportamentos preventivos frente à exposição solar.

1.6 Referências do Capítulo

- Al-Sadek, T. & Yusuf, N., 2024. Ultraviolet radiation biological and medical implications. *Current Issues in Molecular Biology*, **46**, 1924–1942. <https://doi.org/10.3390/cimb46030126>
- Alves, P. V. et al., 2022. Sazonalidade anual e a variabilidade horária mensal do índice ultravioleta para a cidade de Humaitá, Amazonas, Brasil. *Revista Brasileira de Climatologia*, **30**, 504–523. <https://doi.org/10.55761/abclima.v30i18.14622>
- Aun, M., et al., 2019. Daily, seasonal, and annual characteristics of UV radiation and its influencing factors in Tõravere, Estonia, 2004–2016. *Theoretical and Applied Climatology*, **138**, 887–897. <https://doi.org/10.1007/s00704-019-02865-1>
- Bais, A. F. et al., 2019. Ozone–climate interactions and effects on solar ultraviolet radiation. *Photochemical & Photobiological Sciences*, **18**, 602–640. <https://doi.org/10.1039/c8pp90059k>
- Bernhard, G. H. et al., 2023. Stratospheric ozone, UV radiation, and climate interactions. *Photochemical & Photobiological Sciences*, **22**, 937–989. <https://doi.org/10.1007/s43630-023-00371-y>
- Blumthaler, M., 2018. UV monitoring for public health. *International journal of environmental research and public health*, **15**, 1723. <https://doi.org/10.3390/ijerph15081723>
- Bornman, J. F. et al., 2019. Linkages between stratospheric ozone, UV radiation and climate change and their implications for terrestrial ecosystems. *Photochemical & Photobiological Sciences*, **18**, 681–716. <https://doi.org/10.1039/c8pp90061b>
- Costa, R. C. et al., 2022. Incentivo à prevenção primária do câncer de pele na região amazônica: percepções acerca dos riscos e vulnerabilidades. *Research, Society and Development*, **11**, 1-9. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i6.29355>
- Damian, D. L., et al., 2011. An action spectrum for ultraviolet radiation-induced immunosuppression in humans. *British Journal of Dermatology*, **164**, 657–659. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2133.2010.10161.x>
- Dantas, M. M. et al., 2016. Estudo Ecológico das Interações por Neoplasias Malignas da Pele na Região Norte no Período de 2000 a 2014. *Revista Cereus*, **8**, 23-40.
- Diffey, B. L., et al., 1997. The standard erythema dose: a new photobiological concept. *Photodermatology, photoimmunology & photomedicine*, **13**, 64–66. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0781.1997.tb00110.x>
- Eleftheratos, K. et al., 2020. Possible effects of greenhouse gases to ozone profiles and DNA active UV-B irradiance at ground level. *Atmosphere*, **11**, 228. <https://doi.org/10.3390/atmos11030228>
- Ferlay, J. et al., 2021. Cancer statistics for the year 2020: An overview. *International journal of cancer*, **149**, 778–789. <https://doi.org/10.1002/ijc.33588>
- Fitzpatrick, T. B., 1988. The validity and practicality of sun-reactive skin types I through VI. *Archives of dermatology*, **124**, 69–871. <https://doi.org/10.1001/archderm.124.6.869>
- Franco, J. M., Fernandes, G. A., de Paula Corrêa, M. & Silva, L. F., 2016. Exposição do trabalhador rural à radiação ultravioleta: estudo no sul de minas gerais. *Revista Brasileira de Climatologia*, **18**, 53–62. <https://doi.org/10.5380/abclima.v18i0.43651>

- Frank, B. J. R., & Berbet, T. C. (2017). *Ciências ambientais*. Editora e Distribuidora Educacional S.A.
- Garnelo, L. et al., 2020. Barriers to access and organization of primary health care services for rural riverside populations in the Amazon. *International Journal for Equity in Health*, **19**, 1–14. <https://doi.org/10.1186/s12939-020-01171-x>
- Ghissassi, F. E., et al., 2009. A review of human carcinogens – Part D: radiation. *The Lancet Oncology*, **10**, 751–752. [https://doi.org/10.1016/S1470-2045\(09\)70213-X](https://doi.org/10.1016/S1470-2045(09)70213-X)
- Gies, P. et al., 2018. Review of the global solar UV index 2015 workshop report. *Health physics*, **114**, 84–90. <https://doi.org/10.1097/HP.0000000000000742>
- Girard, P. M., et al., 2011). UVA-induced damage to DNA and proteins: Direct versus indirect photochemical processes. *Journal of Physics: Conference Series*, **261**, 1–10. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/261/1/012002>
- Gómez, J. M., et al., 2018. A irradiância solar: conceitos básicos. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, **40**, e3312. <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2017-0342>
- Gómez, J. M. R., 2024. La radiación solar en extremo ultravioleta: implicaciones en la atmósfera de la Tierra. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, **46**, e20230212. <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2023-0212>
- Häder, D.-P., et al., 2007. Effects of solar UV radiation on aquatic ecosystems and interactions with climate change. *Photochemical & photobiological sciences*, **6**, 267–285. <https://doi.org/10.1039/b700020k>
- Halliday, G. M., et al., 2011. Ultraviolet A radiation: its role in immunosuppression and carcinogenesis. **30**, 214–221. <https://doi.org/10.1016/j.sder.2011.08.002>
- Hussein, M. R., 2005. Ultraviolet radiation and skin cancer: molecular mechanisms. *Journal of cutaneous pathology*, **32**, 191–205. <https://doi.org/10.1111/j.0303-6987.2005.00281.x>
- Ialongo, I., et al., 2011. Use of satellite erythemal UV products in analysing the global UV changes. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **11**, 9649–9658. <https://doi.org/10.5194/acp-11-9649-2011>
- ICNIRP, 2004. Guidelines on limits of exposure to ultraviolet radiation of wavelengths between 180 nm and 400 nm (incoherent optical radiation). *Health Physics*, **87**, 171–186. <https://doi.org/10.1097/00004032-200408000-00006>
- INCA, 2019. *Estimativa 2020: incidência de câncer no Brasil*. Rio de Janeiro, Brasil: INCA.
- INCA, 2022. *Estimativa 2023: incidência de câncer no Brasil*. Rio de Janeiro, Brasil: INCA.
- INCA, 2024. *Atlas On-line de Mortalidade*. <https://www.inca.gov.br/MortalidadeWeb/pages/Modelo10/consultar.xhtml>. (Acessado em 12 de dezembro de 2024).
- INPE, 2024. *Centro de previsão de tempo e estudo climáticos*. <https://satelite.cptec.inpe.br/uv/>. (Acessado em 23 de dezembro de 2022).
- Jebar, M. A., et al., 2020. Influence of clouds on OMI satellite total daily UVA exposure over a 12-year period at a southern hemisphere site. *International journal of remote sensing*, **41**, 272–283. <https://doi.org/10.1080/01431161.2019.1641243>

- Juzeniene, A. et al., 2011. Solar radiation and human health. *Reports on Progress in Physics*, **74**, 066701. <http://dx.doi.org/10.1088/0034-4885/74/6/066701>
- Juzeniene, A. & Moan, J., 2012. Beneficial effects of UV radiation other than via vitamin D production. *Dermatoendocrinol.*, **4**, 109–117. <https://doi.org/10.4161/derm.200131>
- Kennedy, C. et al., 2021. Developing indices to identify hotspots of skin cancer vulnerability among the Non-Hispanic White population in the United States. *Annals of epidemiology*, **59**, 64–71. <https://doi.org/10.1016/j.annepidem.2021.04.004>
- Kerr, J. B., 2005. Understanding the factors that affect surface ultraviolet radiation. *Optical Engineering*, **44**, 041002. <https://doi.org/10.1117/1.1886817>
- Kumar, H. D. & Häder, D.-P., 2012. *Global aquatic and atmospheric environment*. Springer Science & Business Media.
- Liou, K.-N., 2002. *An introduction to atmospheric radiation*. Elsevier.
- Lopo, A. B., et al., 2014. Ozone and aerosol influence on ultraviolet radiation on the east coast of the Brazilian Northeast. *Atmospheric and Climate Sciences*, **4**, 92–99. <http://dx.doi.org/10.4236/acs.2014.41012>
- Lucas, R. M. et al., 2019. Human health in relation to exposure to solar ultraviolet radiation under changing stratospheric ozone and climate. *Photochemical & Photobiological Sciences*, **18**, 641–680. <https://doi.org/10.1039/c8pp90060d>
- Malinović-Miličević, S. et al., 2022. Health risks of extended exposure to low-level UV radiation—An analysis of ground-based and satellite-derived data. *Science of the Total Environment*, **831**, 154899. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154899>
- Mesquita, L. G. et al., 2020. Skin Cancer and Family Income: an Ecological Study. *Revista Brasileira de Cancerologia*, **66**, e-07949. <https://doi.org/10.32635/2176-9745.RBC.2020v66n4.949>
- Mélo, K., et al., 2019. Análise temporal da mortalidade por cancer de pele melanona no Brasil: 2000 a 2016. *Surgical & Cosmetic Dermatology*, **11**, 287-294. <http://www.dx.doi.org/10.5935/scd1984-8773.20191131420>
- Modenese, A., et al., 2018. Solar radiation exposure and outdoor work: an underestimated occupational risk. *International journal of environmental research and public health*, **15**, 2063. <https://doi.org/10.3390/ijerph15102063>
- Nehal, K. S. & Bichakjian, C. K., 2018. Update on keratinocyte carcinomas. *New England Journal of Medicine*, **379**, 363–374. <https://doi.org/10.1056/nejmra1708701>
- Parisi, A. V. et al., 2021. Satellite monitoring of environmental solar ultraviolet A (UVA) exposure and irradiance: a review of OMI and GOME-2. *Remote Sensing*, **13**, 752. <https://doi.org/10.3390/rs13040752>
- Reis, G. C. G. et al., 2023. UV index seasonal variability in an Amazonian city of Brazil based on satellite data. *Ciência e Natura*, **45**, e76670. <https://doi.org/10.5902/2179460X76670>
- Reis, G. et al., 2022. Solar Ultraviolet Radiation Temporal Variability Analysis from 2-Year of Continuous Observation in an Amazonian City of Brazil. *Atmosphere*, **13**, 1054. <https://doi.org/10.3390/atmos13071054>

- Sage, E., et al., 2012. Unravelling UVA-induced mutagenesis. *Photochemical & Photobiological Sciences*, **11**, 74–80. <https://doi.org/10.1039/c1pp05219e>
- Saucedo, G. M. G., et al., 2020. Effects of solar radiation and an update on photoprotection. *Anales de Pediatría (English Edition)*, **92**, e1-377.e9. <https://doi.org/10.1016/j.anpedi.2020.04.014>
- SBD, 2021. *Dezembro Laranja: Campanha de prevenção ao câncer de pele*. <https://sbd.org.br/campanha/dezembrolaranja/>. (Acessado em 12 de dezembro de 2023)
- Silva, A. A., et al., 2022. Ground-based and Satellite Measurements of Solar Spectral Irradiances at 305 nm and 380 nm at a Tropical Site. *Photochemistry and Photobiology*, **98**, 1245–1251. <https://doi.org/10.1111/php.13608>
- Silva, S. L., et al., 2020. Câncer de pele na região Norte do Brasil: levantamento das notificações de 2014-2019 pela plataforma DATASUS. *Revista Cereus*, **12**, 198–211. <https://doi.org/10.18605/2175-7275/cereus.v12n3p198-211>
- Sola, Y. & Lorente, J., 2015. Contribution of UVA irradiance to the erythema and photoaging effects in solar and sunbed exposures. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, **143**, 5–11. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2014.10.024>
- Sung, H. et al., 2021. Global cancer statistics 2020: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries. *CA Cancer J. Clin.*, **71**, 209–249. <https://doi.org/10.3322/caac.21660>
- Ullrich, S. E., 2005. Mechanisms underlying UV-induced immune suppression. *Mutation Research*, **571**, 185-205. <https://doi.org/10.1016/j.mrfmmm.2004.06.059>
- Vitt, R. et al., 2020. UV-Index climatology for Europe based on satellite data. *Atmosphere*, **11**, 727. <https://doi.org/10.3390/atmos11070727>
- Weihs, P. et al., 2008. Measurements of UV irradiance within the area of one satellite pixel. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **8**, p. 5615–5626. <https://doi.org/10.5194/acp-8-5615-2008>
- World Health Organization. (2002). Global solar UV index: A practical guide. World Health Organization. <https://www.who.int/publications/i/item/9241590076>
- Young, A. R., et al., 2017. Ultraviolet radiation and the skin: Photobiology and sunscreen photoprotection. *J. Am. Acad. Dermatol.*, **76**, S100–S109. <https://doi.org/10.1016/j.jaad.2016.09.038>

CAPÍTULO 2

2 UMA BREVE REVISÃO DA LITERATURA

Neste segundo capítulo, apresenta-se uma revisão da literatura que abrange os principais conceitos relacionados à radiação ultravioleta solar, incluindo aspectos climatológicos e definições associadas à irradiância ultravioleta biologicamente ativa, ao espectro de ação eritêmica e ao índice ultravioleta. Além disso, discutem-se os impactos da radiação UV na saúde humana, com ênfase nas desigualdades relacionadas à exposição solar e à adoção de práticas de fotoproteção. Por fim, aborda-se a caracterização da vulnerabilidade socioeconômica, incluindo uma análise dos principais índices utilizados para sua avaliação, bem como suas possíveis implicações nos hábitos de fotoexposição e nos desfechos em saúde pública, especialmente em contextos marcados por desigualdades regionais.

2.1 Fundamentos da Radiação Solar Ultravioleta

2.1.1 *Radiação ultravioleta solar e suas derivações*

A radiação solar consiste no fluxo de energia por unidade de área emitido pelo Sol que se propaga pelo espaço na forma de ondas eletromagnéticas. Essa radiação abrange uma ampla faixa de comprimentos de onda (λ), que inclui, notadamente, as regiões do ultravioleta (UV, 100 – 400 nm), da luz visível (VIS, 400 – 750 nm) e do infravermelho (IR, > 750 nm) (Gómez et al., 2018). Embora a radiação UV represente aproximadamente 10% da energia emitida pelo sol, enquanto o VIS e o IR correspondam as maiores parcelas, 40 e 50 %, respectivamente, é o UV que exerce maior influência nos sistemas biológicos (Kumar & Häder, 2012).

Em razão de suas diferentes interações com os organismos e a atmosfera, o espectro UV foi subdividido em três bandas espectrais: UVA (315–400 nm), UVB (280–315 nm) e UVC (100–280 nm). Essa subdivisão foi formalizada durante a reunião de Copenhague, no Segundo Congresso Internacional da Luz, realizado em agosto de 1932 (Diffey et al., 1997; Diffey B. L., 2002; ICNIRP, 2004). Entretanto, observa-se que a literatura especializada em fotobiologia, tanto ambiental quanto dermatológica, frequentemente adota limites distintos, definindo os intervalos como UVA (320–400 nm), UVB (290–320 nm) e UVC (200–290 nm) (Fitzpatrick, 1988; Young et al., 2017). Para

os propósitos desta pesquisa, inserida no campo das Ciências Ambientais, adota-se a convenção estabelecida pelo referido congresso.

O fluxo de radiação solar total emitido pelo Sol é atenuado ao atravessar a atmosfera terrestre devido a processos físicos como espalhamento, reflexão e absorção pelos constituintes atmosféricos – temas que serão abordados com maior detalhamento em seções posteriores. O fluxo de energia incidente por unidade de área na superfície terrestre é denominado irradiância. Da irradiância solar total (TSI, sigla do inglês *Total Solar Irradiance*) que incide no topo da atmosfera, aproximadamente 70% alcançam a superfície, enquanto os 30% restantes são refletidos ou absorvidos ao longo do trajeto (Liou, 2002; Gómez J. M., 2024).

A irradiância espectral na faixa do UV, doravante referida como irradiância solar UV, corresponde a cerca de 10% da TSI, considerando-se a integração das bandas UVA, UVB e UVC. Contudo, praticamente toda a irradiância UVC e aproximadamente 95% da UVB são absorvidas pela camada de ozônio e demais constituintes atmosféricos. Por sua vez, a banda UVA representa a maior fração da radiação UV que atinge a superfície, contribuindo com mais de 95% da irradiância UV disponível ao nível do solo (Aun et al., 2019; Bornman et al., 2019).

Apesar das bandas espectrais UVA, UVB e UVC estarem bem delimitadas, suas contribuições para efeitos fotobiológicos variam significativamente em função do λ e de um receptor biológico. Essa propriedade que descreve a sensibilidade de um receptor biológico a um determinado efeito em função do λ é definido com espectro de ação $S(\lambda)$ (Coblentz & Stair, 1933; McKinlay & Diffey, 1987). A literatura aponta a existência de uma diversidade de espectros de ação tais como, para o eritema, para o câncer de pele não melanoma (NMSC, sigla do inglês *Non-melanoma skin cancer*), dano ao DNA (ácido desoxirribonucleico), fotoenvelhecimento cutâneo, padrão ICNIRP, síntese da vitamina D₃, dentre outros (Schmalwieser et al., 2022) (Figura 2-1).

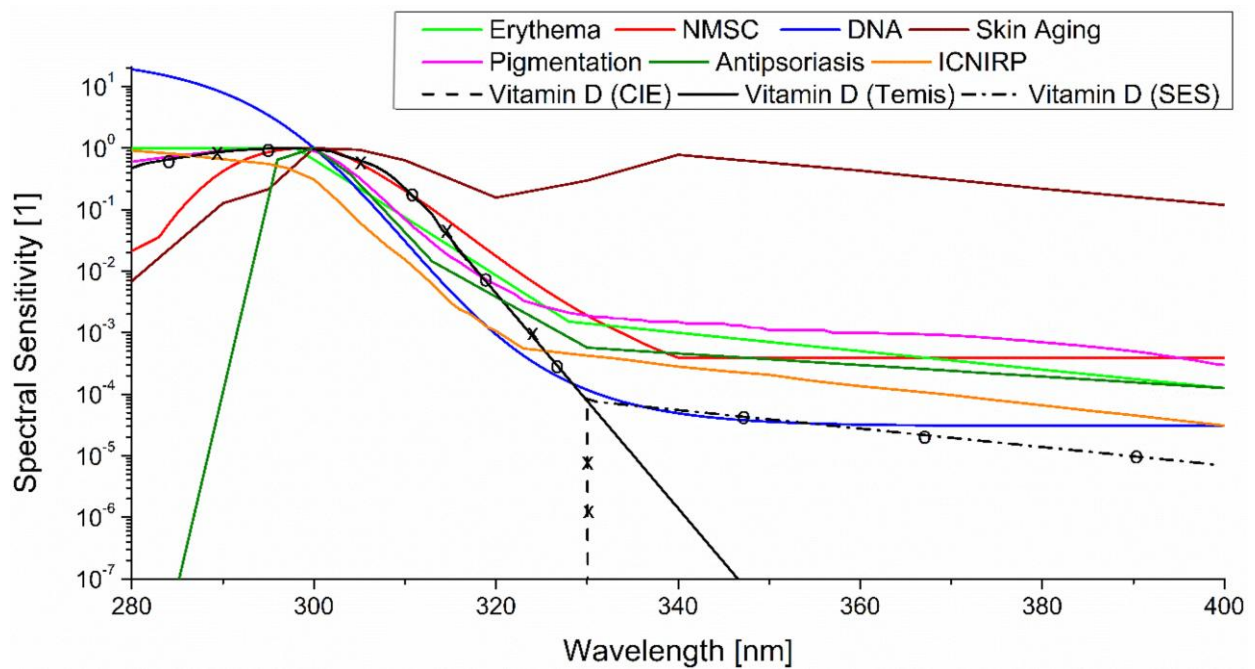


Figura 2-1 - Espectros de ação para diversos efeitos fotobiológicos em função do λ . Fonte. Schmalwieser et al., (2022).

Dentre os espectros apresentados anteriormente, vale a pena descrever três deles: (i) o padrão da ICNIRP, o qual define, além do espectro de ação, limites para a fotoexposição segura de trabalhadores. É em certo modo, mais abrangente, pois representa risco geral (pele e olhos) e difere do eritema em toda a faixa UV (ICNIRP, 2004); (ii) o espectro de ação para o NMSC, que é um padrão ISO, apresenta eficiência entre 295 e 310 nm com maior efetividade em 300 nm (ISO, 2024); (iii) o espectro de ação para o eritema, que é reconhecido como referência para os demais (Coblentz & Stair, 1933; McKinlay & Diffey, 1987).

O espectro de ação eritêmico é uma função que expressa a sensibilidade da pele ao longo dos diferentes comprimentos de onda do UV, apresentando um pico de eficácia na região do UVB, particularmente entre 250 e 298 nm, e decrescendo acentuadamente em direção ao UVA. A Equação (1) já é uma versão revisada por Webb et al., (2011), haja vista algumas inconsistências na forma proposta originalmente por McKinlay & Diffey, (1987).

$$S_{er}(\lambda) = \begin{cases} 1, & 250 < \lambda \text{ (nm)} \leq 298, \\ 10^{0,094(298-\lambda)}, & 298 < \lambda \text{ (nm)} \leq 328, \\ 10^{0,015(139-\lambda)}, & 328 < \lambda \text{ (nm)} \leq 400. \end{cases} \quad (1)$$

A integração da irradiância espectral UV com o S_{er} permite quantificar a fração da irradiância UV efetivamente capaz de provocar danos biológicos, conceito conhecido como

irradiância UV biologicamente ativa ou irradiância eritêmica. Essa relação é expressa matematicamente por:

$$E_{er} = \int_{250}^{400} E(\lambda) \cdot S(\lambda) d\lambda, \quad (2)$$

onde E_{er} é a irradiância eritêmica ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$), $E(\lambda)$ representa a irradiância espectral no UV em função de λ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$), e $S(\lambda)$ é o espectro de ação eritêmica (adimensional).

A partir do conceito de irradiância eritêmica, foi desenvolvido um indicador padronizado para expressar, de forma simplificada, o risco potencial da radiação UV incidente à superfície terrestre: o índice ultravioleta (UVI, sigla do inglês *Ultraviolet Index*). O UVI é calculado pelo produto da E_{er} por um fator de escala igual a $40 \text{ m}^2 \cdot \text{W}^{-1}$, sintetizando a quantidade de radiação UV biologicamente ativa, ponderada pelo espectro de ação eritêmica, e fornecendo um parâmetro prático para a comunicação dos riscos à saúde humana associados à exposição solar (Gies et al., 2018).

Internacionalmente, a escala do UVI foi estabelecida por organizações como a Organização Mundial da Saúde (WHO, do inglês *World Health Organization*), a Organização Meteorológica Mundial (WMO, do inglês *World Meteorological Organization*) e a Comissão Internacional de Iluminação (CIE, do inglês *International Commission on Illumination*), conforme apresentado no Quadro 2-1, sendo igualmente adotada no Brasil por instituições como o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e a Sociedade Brasileira de Dermatologia (SBD).

UVI	Risco	Cuidados
0 a 2	Baixo	Condições seguras para a maioria da população; recomenda-se precaução mínima.
3 a 5	Moderado	Sugere-se uso de protetor solar, óculos de sol e roupas adequadas, especialmente para indivíduos mais sensíveis.
6 a 7	Alto	A exposição prolongada sem proteção pode causar danos; é necessário uso de barreiras físicas e evitar exposição prolongada.
8 a 10	Muito Alto	Requer medidas rigorosas de fotoproteção, como evitar exposição entre 10h e 15h, uso de chapéus, roupas de manga longa, filtro solar de amplo espectro e óculos escuros
11+	Extremo	Mesmo exposições curtas podem resultar em danos severos; recomenda-se evitar exposição direta ao Sol.

Quadro 2-1 - Intervalos do Índice UV associados aos riscos de exposição e orientações para a fotoexposição adequada. Fonte. Adaptado de Gies et al. (2018).

É importante destacar que o UVI constitui uma medida instantânea da intensidade da E_{er} , não levando em consideração diretamente o tempo de exposição, isto é, o UVI expressa a taxa de

radiação eritêmica incidente na superfície em um dado momento, sem integrar o tempo de exposição ao cálculo (WMO, 1998; WHO, 2002). Contudo, a exposição prolongada à radiação UV resulta em uma dose acumulada, que pode ser estimada a partir da multiplicação da E_{er} pelo intervalo de tempo (Δt) de exposição. Essa dose acumulada é fundamental para avaliar o risco efetivo de danos biológicos, como o eritema, sendo comumente expressa em joules por metro quadrado ($J \cdot m^{-2}$) (Diffey, 1994; Young et al., 2017).

Assim, além do uso do UVI como uma métrica instantânea, a avaliação dos efeitos cumulativos da exposição à radiação UV requer a consideração do tempo de exposição, resultando em variáveis como Taxa de Dose Eritêmica (EDR, sigla do inglês *Erythema Dose Rate*) e a Dose Eritêmica Diária (EDD, sigla do inglês *Erythema Daily Dose*). A EDR representa a taxa horária da E_{er} , que nesta pesquisa é quantificada para o período durante o meio-dia solar local, enquanto a EDD corresponde à dose total acumulada ao longo do dia, obtida pela integração da E_{er} durante o período diário (Hovila et al., 2013).

2.1.2 Fatores que influenciam a irradiância ultravioleta na superfície

A irradiância UV até alcançar a superfície terrestre é fortemente modulada por fatores astronômicos e atmosféricos que impactam diretamente sua variabilidade temporal e espacial. Dentre os fatores astronômicos, destacam-se o Ângulo Zenital Solar (SZA, sigla do inglês *Solar Zenith Angle*), a variação da distância Terra-Sol e a variabilidade solar intrínseca (Liou, 2002). O SZA, definido como o ângulo entre a direção do Sol e a vertical local, é um dos principais determinantes do comportamento da irradiância UV. Este parâmetro varia ao longo do dia, das estações do ano e com a latitude, influenciando diretamente a trajetória dos raios solares na atmosfera. Quanto maior o SZA, maior o percurso da radiação através da atmosfera, aumentando os processos de absorção e espalhamento e, conseqüentemente, reduzindo a irradiância UV incidente na superfície. Adicionalmente, desconsiderando-se a absorção atmosférica, a irradiância varia aproximadamente de forma proporcional ao cosseno do SZA (Kerr, 2005; Kumar & Häder, 2012).

A variação da distância Terra-Sol ocorre em razão da órbita elíptica descrita ao redor do Sol, resultando em variações sazonais na distância entre ambos. Durante o periélio (por volta de 3 de janeiro), a Terra encontra-se mais próxima do Sol, enquanto no afélio (por volta de 5 de julho) a distância é máxima. Essa diferença de aproximadamente 3,4% provoca uma variação na

irradiância de cerca de 7%, ocasionando níveis mais elevados da irradiância UV durante os verões do Hemisfério Sul em comparação ao Hemisfério Norte (Gómez et al., 2018).

A variabilidade solar intrínseca está associada à rotação aparente do Sol, com um ciclo de aproximadamente 27 dias, e ao ciclo de atividade das manchas solares, que ocorre em torno de cada 11 anos. Contudo, essas oscilações afetam predominantemente os comprimentos de onda absorvidos na alta atmosfera ($\lambda < 290$ nm), de modo que seu impacto sobre os níveis de radiação UVB e UVA que alcançam a superfície terrestre é mínimo (Gómez J. M., 2024).

Além dos fatores astronômicos, os processos físicos e químicos que ocorrem na atmosfera desempenham papel fundamental na modulação da irradiância UV que atinge a superfície terrestre. À medida que a radiação solar atravessa as diferentes camadas atmosféricas, sua intensidade e composição espectral são alteradas por mecanismos de absorção e espalhamento, cuja magnitude varia conforme a presença e concentração dos constituintes atmosféricos (Liou, 2002).

Na estratosfera, situada entre aproximadamente 10 e 50 km acima do nível do mar, destacam-se a absorção da radiação UV pelo ozônio e o espalhamento por moléculas de nitrogênio (N_2) e oxigênio (O_2). Esses processos limitam substancialmente a quantidade de radiação UV, especialmente na faixa UVB, que alcança a superfície (Bernhard et al., 2023). De fato, na estratosfera onde fótons ($\lambda < 290$ nm) interagem com moléculas de O_2 , ocorre a fotólise do oxigênio molecular em dois átomos de oxigênio. Esses átomos resultantes são altamente reativos e, em seguida, reagem com outras moléculas de oxigênio para formar o ozônio (O_3). Essa formação de O_3 é fundamental para a criação da camada de ozônio na estratosfera, que desempenha um papel vital na filtragem dos fótons mais energéticos que compõem a irradiância UVB (Bornman et al., 2019).

Historicamente, as emissões de substâncias responsáveis pela degradação do O_3 levaram a um aumento significativo da irradiância UVB em latitudes médias de ambos os hemisférios durante as décadas de 1980 e 1990 (Solomon et al., 1986; McConnell et al., 1992; Kerr & McElroy, 1993; Zerefos et al., 1995; Madronich et al., 1998). No entanto, evidências indicam que a recuperação da camada de ozônio nas regiões Ártica e Antártica está em curso desde meados da década de 1990, contribuindo para a redução dos fluxos de UVB na superfície terrestre (Eleftheratos et al., 2015; Bais et al., 2019; Eleftheratos et al., 2020; Fountoulakis et al., 2021). Sem essa recuperação, as regiões de latitudes médias e baixas estariam expostas a fluxos de UVB

significativamente mais elevados, com consequências adversas para a saúde humana e para os ecossistemas (Sousa et al., 2020).

Na troposfera, que se estende da superfície terrestre até cerca de 10 km de altitude, os principais agentes de atenuação incluem a absorção por poluentes atmosféricos — como ozônio troposférico, dióxido de nitrogênio (NO₂) e dióxido de enxofre (SO₂) —, bem como o espalhamento por aerossóis e partículas em suspensão (Madronich et al., 2018).

Partículas suspensas na atmosfera, conhecidas como aerossóis, oriundas de fontes naturais (como poeira mineral, sais marinhos e emissões vulcânicas) ou antropogênicas (como queima de biomassa e poluição industrial), desempenham um papel significativo na modulação da transmissão da radiação UV. Esses aerossóis interagem com a radiação eletromagnética por meio de dois mecanismos principais: espalhamento e absorção (Liou, 2002; Kerr J. B., 2005).

O espalhamento ocorre quando a radiação incidente é desviada em múltiplas direções ao interagir com partículas cuja dimensão é comparável ou menor que o comprimento de onda da luz incidente. No caso da radiação UV, destaca-se o espalhamento de Rayleigh, predominante para partículas muito menores que o comprimento de onda (como moléculas de gases), cuja intensidade é inversamente proporcional à quarta potência do comprimento de onda (λ^{-4}), resultando em maior dispersão para comprimentos de onda menores, como o UVB (Li et al., 2016). Para partículas de tamanho similar ou maior que o comprimento de onda, como poeira, fuligem e gotículas de poluentes, o processo é regido pelo espalhamento de Mie, cuja dependência espectral é menos acentuada e mais sensível à distribuição de tamanhos e aos índices de refração das partículas (Häder et al., 2007; Che et al., 2015; Sirithian & Thanatrakolsri, 2022).

Além do espalhamento, os aerossóis também podem absorver parte da radiação UV, convertendo energia radiante em energia térmica. A eficiência desse processo é determinada pelas propriedades ópticas das partículas, especialmente pelo coeficiente de absorção e pelo índice de absorção imaginário do índice de refração. Aerossóis ricos em carbono (como *black carbon*) ou óxidos metálicos apresentam elevada capacidade absorptiva, intensificando a atenuação da irradiância UV (Che et al., 2015).

Do ponto de vista observacional, a presença e a concentração dos aerossóis na atmosfera podem ser quantificadas por parâmetros como a concentração de material particulado respirável (PM_{2.5}) e inalável (PM₁₀), expressos em microgramas por metro cúbico ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), bem como pela Profundidade Óptica dos Aerossóis medida a 550 nm (AOD₅₅₀), uma variável adimensional que

representa a extinção da radiação devido à presença de partículas ao longo da coluna atmosférica. Regiões com altos índices de $PM_{2.5}$ e PM_{10} ou com valores elevados de AOD_{550} tendem a apresentar uma redução significativa da irradiância UV incidente na superfície, resultado da combinação dos processos de espalhamento e absorção anteriormente descritos (Tsekeri et al., 2017). A presença de nuvens também exerce influência significativa, podendo reduzir ou, em determinadas condições, até aumentar a irradiância UV ao nível do solo.

De fato, embora a cobertura de nuvens seja frequentemente considerada um fator atenuante da radiação solar, sob determinadas condições ela pode amplificar a radiação, aumentando, assim, os riscos associados à exposição inadequada (Calbó et al., 2005). De modo geral, as nuvens exercem uma influência significativa sobre a radiação solar que alcança a superfície terrestre, uma vez que a presença de gotículas de água ou cristais de gelo favorece o espalhamento da radiação (Aebi et al., 2020).

A magnitude da atenuação ou amplificação dos fluxos radiativos devido à presença de nuvens depende de variáveis como o tipo de nuvem, sua espessura óptica, dinâmica e posição relativa ao Sol, considerando-se o ângulo zenital solar. A Espessura Óptica das Nuvens (COT, sigla do inglês *Cloud Optical Thickness*) é amplamente utilizada para quantificar a capacidade das nuvens em atenuar ou dispersar a radiação solar. Nuvens com maior COT tendem a reduzir substancialmente a irradiância UV, enquanto nuvens finas ou distribuídas de forma descontínua podem gerar amplificação localizada devido ao espalhamento múltiplo (Miguel et al., 2011; Silva, 2013; Jebar et al., 2020).

Além disso, destaca-se que a formação e evolução da cobertura de nuvens estão intimamente relacionadas à presença de vapor d'água na atmosfera. O conteúdo total de vapor d'água (TCWV, sigla do inglês *Total Column Water Vapor*) representa uma variável chave nesse contexto, uma vez que valores elevados de TCWV favorecem a formação de nuvens e influenciam diretamente o perfil radiativo atmosférico (Fu et al., 2013; Leite-Filho et al., 2019). A TCWV é uma das variáveis analisadas neste estudo por representar a variabilidade do vapor d'água. Essa apresenta forte dependência da temperatura e umidade locais, sendo particularmente relevante em regiões tropicais como a Amazônia (Diffey, 2002).

O vapor d'água, principal gás de efeito estufa da atmosfera terrestre, possui influência indireta e direta sobre a transmissão da radiação solar, embora seu impacto específico na faixa do ultravioleta seja relativamente menor em comparação a outros constituintes, como ozônio ou

aerossóis. Sua principal atuação ocorre através de absorção molecular seletiva, predominantemente em bandas do infravermelho e do visível, devido à presença de múltiplas linhas espectrais associadas às transições vibracionais e rotacionais da molécula de H₂O (Liou, 2002; Kumar & Häder, 2012).

No espectro do UV, o vapor d'água apresenta baixa capacidade absorptiva, sendo seu efeito direto sobre a atenuação da irradiância UV praticamente desprezível. Entretanto, sua concentração atmosférica está fortemente correlacionada à formação e desenvolvimento de nuvens, que, como discutido anteriormente, exercem papel crítico na modulação da irradiância UV, tanto pela atenuação quanto pela possível amplificação sob determinadas condições. Assim, o vapor d'água atua indiretamente ao influenciar o ciclo hidrológico e a variabilidade da cobertura de nuvens, afetando os fluxos radiativos incidentes na superfície (Wang et al., 2016).

Segundo de Miguel et al. (2011) ao meio-dia solar em Valladolid, Espanha, observou-se que a irradiância entre 305 e 2800 nm apresentou sensibilidade elevada à presença de nuvens, podendo ser amplificada em até 47%, enquanto a irradiância entre 280 e 400 nm poderia ser atenuada em até 93% ou amplificada em até 22%. De maneira similar, Silva (2013) reportou incrementos na incidência de radiação UV sob céu nublado ao meio-dia solar em Belo Horizonte, Brasil, com índices UV apresentando aumentos de até 19% acima dos níveis típicos do verão. Esses resultados evidenciam que a percepção generalizada de que as nuvens sempre reduzem a radiação solar pode levar a equívocos, contribuindo para exposições inadequadas em condições nubladas.

Além disso, em comprimentos de onda adjacentes ao UV, particularmente na região do visível e próximo-infravermelho (NIR), o vapor d'água contribui para a absorção significativa da radiação solar, alterando o balanço energético da atmosfera e modulando a transmissão espectral total. Esse efeito se reflete na redistribuição da energia ao longo da coluna atmosférica, podendo impactar processos de espalhamento e absorção de outras bandas, inclusive o UV, de forma indireta (Kumar & Häder, 2012). Dessa forma, tanto a COT quanto o TCWV configuram-se como variáveis essenciais para a compreensão da variabilidade da irradiância UV na superfície terrestre, sendo analisadas detalhadamente neste estudo.

Além dos fatores astronômicos e atmosféricos previamente discutidos, variáveis geográficas como latitude e altitude também exercem influência significativa sobre os níveis de irradiância UV na superfície terrestre. A latitude determina a inclinação dos raios solares em relação à superfície, afetando o ângulo zenital solar e, consequentemente, o percurso óptico da radiação

através da atmosfera. Em regiões tropicais (até aproximadamente 20° de latitude norte e sul), a irradiância UV diária apresenta variações sazonais relativamente moderadas, com aumentos de cerca de 25% durante o verão e reduções de até 30% no inverno, quando comparadas aos níveis observados durante os equinócios. Em contraste, em zonas temperadas (próximas a 40° de latitude), essa variabilidade sazonal é mais acentuada, podendo exceder 70% entre os solstícios e os equinócios, em razão da maior inclinação do eixo da Terra e da variação mais expressiva do ângulo zenital ao longo do ano (Diffey B. L., 1991; Okuno & Vilela, 2005).

Outro fator determinante é a altitude. À medida que se eleva a altitude, a densidade atmosférica e, conseqüentemente, a quantidade de massa de ar disponível para absorção e espalhamento da radiação UV, diminuem. Estima-se que o fluxo de irradiância UV aumente, em média, cerca de 6% a cada quilômetro de elevação, embora este valor possa variar dependendo das condições atmosféricas locais (Liou, 2002; Kumar & Häder, 2012).

Adicionalmente, fatores como a hora do dia (diretamente associada à variação diurna do SZA) e o albedo superficial, que influencia a refletância da radiação UV, também modulam a irradiância disponível na superfície. Superfícies altamente refletivas, como neve ou areia clara, podem aumentar localmente os níveis de radiação UV devido à reflexão adicional (Kumar & Häder, 2012).

Esses elementos geográficos e topográficos, embora não tão dinâmicos quanto os constituintes atmosféricos, são essenciais para a compreensão completa da distribuição espacial e temporal da irradiância UV e, por consequência, para a análise de seus efeitos sobre os sistemas ambientais e a saúde humana.

2.2 Impactos da Radiação UV na Saúde e na Sociedade

A radiação UV, ao atingir a superfície terrestre, exerce efeitos diversos sobre os sistemas biológicos, notadamente sobre a saúde humana. Esses efeitos podem ser benéficos ou nocivos, a depender de múltiplos fatores, como a duração da exposição, o período do dia em que ocorre — sendo os níveis de irradiância UVB mais intensos entre 10h e 15h —, e a adoção de medidas adequadas de fotoproteção. Assim, o impacto da radiação UV sobre o organismo está condicionado não apenas à sua intensidade, mas também às práticas individuais de exposição, que modulam os riscos e benefícios associados. Nesta seção, exploram-se os principais efeitos da radiação UV, tanto positivos quanto adversos, à luz dos conceitos apresentados previamente. Em seguida, discute-se a

Escala de Fitzpatrick, importante referencial na avaliação da sensibilidade cutânea à radiação UV, suas aplicações e limitações.

2.2.1 Efeitos biológicos da radiação ultravioleta

Os efeitos biológicos da radiação UV decorrem, principalmente, da interação da irradiância UVA e UVB com os tecidos biológicos, notadamente a pele e os olhos. A eficácia da radiação UV em provocar respostas biológicas está associada ao espectro de ação específico de cada efeito, conforme discutido anteriormente.

Entre os efeitos adversos mais amplamente documentados, destaca-se o eritema solar, uma resposta inflamatória aguda da pele resultante da exposição excessiva à radiação UV, especialmente à UVB. O eritema constitui um marcador inicial de dano epidérmico e, quando repetido ou prolongado, pode desencadear alterações celulares que culminam em patologias mais graves (Sage et al., 2012; Young et al., 2017).

A exposição crônica e sem proteção adequada à radiação UV é um fator determinante para o desenvolvimento de diversos tipos de câncer de pele, notadamente os não melanoma (carcinoma basocelular e carcinoma espinocelular) e o melanoma (Hussein, 2005; Ferlay et al., 2021; Sung et al., 2021). O mecanismo primário está associado à indução de lesões no DNA celular, especialmente pela radiação UVB, conforme evidenciado pelo espectro de ação para o NMSC, com maior efetividade em torno de 300 nm (Ghissassi et al., 2009; Damian et al., 2011; Young et al., 2017; Eleftheratos et al., 2020; Al-Sadek & Yusuf, 2024). Além disso, a exposição inadequada à radiação UV pode afetar outras estruturas, como os olhos, aumentando o risco para lesões oculares, incluindo fotoqueratite, pinguécula e pterígio (Behar-Cohen, et al., 2013; Löfgren, 2017).

Adicionalmente, o fotoenvelhecimento cutâneo — caracterizado por perda de elasticidade, rugas e hiperpigmentações — também é amplificado pela exposição cumulativa ao UVA, que penetra profundamente nas camadas dérmicas, promovendo degradação do colágeno (Sola & Lorente, 2015; Saucedo et al., 2020; Passeron et al., 2021).

Outro efeito relevante é a imunossupressão induzida pela radiação UV, mecanismo pelo qual a exposição a esse espectro altera a resposta imunológica cutânea e sistêmica, favorecendo o desenvolvimento de infecções e potencializando desordens autoimunes. Esse efeito possui implicações significativas para populações expostas de forma contínua à radiação solar intensa (Ullrich, 2005; Halliday et al., 2011; Sola & Lorente, 2015; Young et al., 2017).

No entanto, apesar dos riscos mencionados, a radiação UV também desempenha funções benéficas para a saúde humana. Destaca-se a síntese cutânea da vitamina D₃ (colecalciferol), que ocorre a partir da exposição da pele à radiação UVB, sendo essencial para a homeostase do cálcio, saúde óssea e função imunológica (Lucas et al., 2015; Erem & Razzaque, 2021; Al-Sadek & Yusuf, 2024). Além disso, exposições moderadas à radiação UV podem induzir a produção de óxido nítrico, associado à vasodilatação e à redução da pressão arterial, bem como exercer efeitos antimicrobianos (Juzeniene & Moan, 2012; Quan et al., 2023).

Adicionalmente, a radiação UV é amplamente utilizada em aplicações terapêuticas controladas, como na fototerapia com UVB de banda estreita e na combinação psoraleno + UVA (PUVA), para o tratamento de doenças dermatológicas como psoríase, vitiligo, dermatite atópica e esclerodermia localizada (Juzeniene et al., 2011). Esses procedimentos médicos utilizam doses precisas e monitoradas de radiação UV para obter efeitos anti-inflamatórios e imunossupressores localizados, sempre sob supervisão clínica rigorosa (Juzeniene & Moan, 2012; Al-Sadek & Yusuf, 2024).

Cabe destacar ainda que os impactos da radiação UV não se restringem à saúde humana. Diversos estudos apontam que a exposição excessiva ao UV pode provocar alterações estruturais e fisiológicas em plantas terrestres, resultando, por exemplo, em redução da área foliar e na eficiência da fotossíntese, com implicações sobre os ecossistemas (Kumar & Häder, 2012; Bornman et al., 2019). Da mesma forma, organismos aquáticos e materiais não vivos também podem sofrer degradação quando submetidos a níveis elevados de irradiância UV (Häder et al., 2007).

Assim, observa-se que a radiação UV, embora essencial para diversos processos fisiológicos, terapêuticos e ecológicos, requer um manejo cuidadoso e consciente para evitar seus efeitos deletérios.

Além dos impactos diretos na saúde humana, a exposição inadequada à radiação UV possui repercussões significativas na sociedade. Questões socioeconômicas, como desigualdade no acesso a medidas de fotoproteção, precarização das condições laborais e limitações no acesso à informação, tornam determinados grupos populacionais mais suscetíveis aos efeitos adversos da radiação solar (Szklo et al., 2007). Trabalhadores expostos ao ar livre, especialmente em setores como agricultura, pesca e construção civil, enfrentam riscos elevados sem a devida proteção, resultando em custos sociais e econômicos associados ao aumento da incidência de doenças

cutâneas e oftalmológicas (Girard et al., 2011; Behar-Cohen et al., 2013; Ceballos et al., 2014; Franco et al., 2016; Blumthaler, 2018). Adicionalmente, práticas culturais relacionadas à exposição intencional ao sol, influenciadas por padrões estéticos e comportamentais, também contribuem para a intensificação desses impactos, exigindo estratégias educativas e políticas públicas que considerem essas dimensões (Benvenuto-Andrade et al., 2005).

Dados epidemiológicos reforçam a magnitude desse problema em escala global. De fato, para o ano de 2020 foram estimados aproximadamente 1,2 milhões de novos casos de NMSC no mundo (Ferlay et al., 2021; Sung et al., 2021). No Brasil, o NMSC configura-se como o câncer mais prevalente, superando todos os demais tipos, onde para cada ano do triênio 2020–2022, previu-se cerca de 177 mil novos casos, representando mais de 27% de todos os tumores malignos registrados no país (INCA, 2019). Para o triênio 2023–2025, as estimativas apontam um crescimento para 221 mil casos novos por ano, correspondendo a 31,3% do total de casos de câncer (INCA, 2022; Santos et al., 2023). Embora os dados epidemiológicos e fatores específicos relacionados ao câncer de pele sejam abordados em detalhes em seção posterior desta tese, destaca-se aqui a expressiva contribuição dessa enfermidade para os impactos sociais e econômicos associados à exposição inadequada à radiação UV.

Além da elevada incidência, os custos diretos e indiretos decorrentes do tratamento de doenças relacionadas à radiação UV exercem considerável pressão sobre os sistemas de saúde pública. Estudos realizados em diversos países apontam que o tratamento do câncer de pele, em especial os casos não melanoma, representa um dos maiores encargos financeiros dentre as neoplasias, tanto pelo volume de casos quanto pela necessidade de procedimentos cirúrgicos, acompanhamento clínico e campanhas preventivas (Souza et al., 2011; Dantas et al., 2016; Pires et al., 2016; Leopoldino & Gonçalves, 2019; Abdel-Rahman, 2020). No contexto brasileiro, estima-se que tais custos sejam agravados pelas desigualdades regionais no acesso ao diagnóstico precoce e aos serviços especializados, resultando em maior demanda por tratamentos avançados e internações hospitalares. Essa realidade evidencia a necessidade de políticas públicas voltadas não apenas ao tratamento, mas, principalmente, à prevenção e educação para redução dos riscos associados à exposição excessiva à radiação UV, especialmente entre populações vulneráveis (Rizzatti et al., 2011).

2.3 Fototipos Cutâneos e Resposta à Radiação Ultravioleta

A avaliação da suscetibilidade individual aos efeitos fotobiológicos da radiação UV, como desenvolvimento do eritema, é essencial em estudos de saúde pública e fotoproteção. Para este fim, a Escala de Fototipos Cutâneos de Fitzpatrick (FSPC, sigla do inglês *Fitzpatrick Skin Phototype Classification*) é amplamente utilizada e reconhecida internacionalmente como referência. Desenvolvida por Fitzpatrick (1988), essa escala classifica a pele humana em seis fototipos distintos, baseando-se na cor da pele, tendência à queimadura solar e capacidade de bronzeamento.

Essas categorias são fundamentadas na quantidade de melanina e na resposta cutânea à exposição solar. Os fototipos I e II, denominados melano-comprometidos, englobam indivíduos de pele muito clara a clara, com baixa produção de melanina, alta propensão à queimadura solar e pouca ou nenhuma capacidade de bronzeamento. Os fototipos III e IV, considerados melano-competentes, correspondem a indivíduos com pele clara a morena moderada, que apresentam uma resposta intermediária: queimam com menos frequência e adquirem bronzeamento progressivo. Já os fototipos V e VI, classificados como melano-protegidos, caracterizam-se pela elevada concentração de melanina, típica de peles morenas escuras a negras profundas, sendo altamente resistentes ao eritema e com bronzeamento natural intenso (Pathak et al., 1976; Fitzpatrick, 1986; Araújo et al., 2014).

Essa classificação está intrinsecamente relacionada a Dose Mínima Eritemal (MED, sigla do inglês *Minimal Erythral Dose*), que quantifica a quantidade de radiação UV necessária para induzir eritema em cada fototipo (Quadro 2-2). Indivíduos melano-comprometidos possuem MED mais baixas, indicando maior sensibilidade à radiação UV, enquanto os melano-protegidos demandam doses significativamente maiores para desenvolverem eritema, devido à proteção conferida pela melanina (Pathak et al., 1976; Ghissassi et al., 2009).

Fototipo	Queimadura	Bronzeamento	DME (UVB) (mJ·cm ⁻²)	DME (UVA) (J·cm ⁻²)
I	Sim	Não	20 – 30	20 – 35
II	Sim	Leve	25 – 35	30 – 45
III	Sim	Médio	30 – 50	40 – 55
IV	Não	Escuro	45 – 60	50 – 80
V	Não	Parda naturalmente	60 – 100	70 – 100
VI	Não	Preta naturalmente	100 – 200	> 100

Quadro 2-2 - Escala de Fitzpatrick considerando a capacidade de bronzeamento, suscetibilidade à queimadura quando exposto em determinados intervalos de MED no UVA (320 – 400 nm) e UVB (290 – 320 nm). Adaptado de Fitzpatrick (1988).

A aplicação prática da escala consiste na análise de características genéticas e comportamentais do indivíduo, por meio de um questionário que avalia:

- Cor dos olhos e dos cabelos;
- Cor da pele em áreas não expostas;
- Presença de sardas;
- Resposta da pele após exposição prolongada ao sol (tendência à queimadura e bronzeamento);
- Hábitos de exposição solar ou uso de câmaras de bronzeamento.

Cada resposta recebe um *score* e, após a soma total, determina-se o fototipo correspondente, permitindo uma avaliação simples e direta, com potencial de aplicação em contextos clínicos e epidemiológicos (Gupta & Sharma, 2019).

No entanto, é importante considerar algumas limitações na utilização da FSPC em populações miscigenadas, como a brasileira. Por tratar-se de uma classificação baseada predominantemente em características fenotípicas visíveis, a escala pode não refletir plenamente a complexidade genética e cultural do país, além de apresentar certo grau de subjetividade na autodeclaração dos atributos (Kennedy et al., 2021). Ainda assim, estudos realizados em países da América do Sul, como o Equador, demonstraram que, embora a FSPC apresente baixa consistência interna em alguns aspectos, sua validade de construto é aceitável, podendo ser utilizada de forma generalizada com adaptações mínimas (Fors et al., 2020). Os autores destacam que versões modificadas da escala, com menos itens e maior objetividade, podem ser eficazes em contextos de elevada diversidade fenotípica.

Em outras regiões do mundo, diferentes propostas de classificação cutânea têm sido desenvolvidas para atender às especificidades étnicas, culturais e fenotípicas das populações locais. Destacam-se, entre elas, as escalas propostas por Lancer (1998), Fanous (2002) e Goldman (2008), que combinam características visíveis da pele com informações sobre ancestralidade, oferecendo uma abordagem mais abrangente para populações não caucasianas. Além dessas, outras ferramentas têm sido empregadas, como a escala de Taylor, voltada para avaliação de hiperpigmentação em diferentes tons de pele (Taylor et al., 2005), e o sistema de classificação de tipos de pele *Roberts*, que propõe uma análise mais refinada considerando pigmentação, sensibilidade e predisposição a condições específicas como melasma ou fotoenvelhecimento (Roberts, 2008).

Contudo, embora essas alternativas apresentem vantagens técnicas e maior detalhamento, sua aplicação em larga escala exige infraestrutura adequada, equipamentos específicos e profissionais capacitados. Essa realidade torna sua implementação menos factível em contextos socioeconômicos desafiadores, como áreas isoladas e de difícil acesso da região amazônica, reforçando a relevância de métodos mais simples e padronizados, como a FSPC.

No Brasil, o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) adota atualmente uma classificação de cor ou raça baseada em autodeclaração, distribuindo a população em cinco categorias: branca, preta, parda, amarela e indígena (IBGE, 2020). Essa categorização, embora relevante para estudos sociodemográficos, possui um enfoque predominantemente sociocultural e subjetivo, sem apresentar parâmetros fisiológicos diretamente relacionados à sensibilidade cutânea à radiação UV. Não há, por exemplo, qualquer associação entre as categorias utilizadas e variáveis como MED.

Diante do cenário epidemiológico apresentado pelo INCA, observa-se um aumento nos casos de NMSC no país. De fato, houve com crescimento de 4,3 pontos percentuais entre o triênio 2023-2025 e o anterior. Somam-se a isso mais de 47 mil óbitos registrados por melanoma maligno entre 1979 e 2022, com tendência de crescimento significativa inclusive na região Norte (Mélo et al., 2019; Silva et al., 2020; INCA, 2024). Esses dados endossam a urgência de incorporar instrumentos como a FSPC nos censos e pesquisas nacionais, haja vista sua ampla aceitação internacional e simplicidade de aplicação.

A FSPC oferece uma ferramenta objetiva, clinicamente validada e de baixo custo, capaz de subsidiar políticas públicas voltadas à fotoproteção e à prevenção de doenças dermatológicas (Rigel et al., 2022). Mesmo reconhecendo suas limitações — especialmente no contexto amazônico, caracterizado por intensa miscigenação e acesso restrito a serviços especializados, como dermatologistas —, seu uso desponta como uma alternativa viável para suprir lacunas na identificação do perfil de risco cutâneo da população, contribuindo para estratégias mais eficazes de saúde pública (Garnelo et al., 2020).

Na região amazônica, onde as atividades econômicas são majoritariamente baseadas em longas jornadas de trabalho ao ar livre, tal exposição acentua consideravelmente os riscos à saúde das populações locais (Modenese & Gobba, 2018; Mesquita et al., 2020). A ausência de medidas preventivas eficazes, aliada à oferta limitada de serviços especializados em saúde, como a escassez de dermatologistas, intensifica ainda mais esse cenário de risco.

Nesse contexto, torna-se urgente a implementação de estratégias de fotoproteção adaptadas às realidades regionais, bem como a promoção de campanhas educativas e de conscientização direcionadas à prevenção, com foco especial nos trabalhadores expostos (Costa et al., 2022; SBD, 2021a; SBD, 2021b). Tais ações são fundamentais para mitigar os efeitos adversos da exposição solar e reduzir a carga futura do NMSC na Amazônia e em outras regiões com condições socioeconômicas e em outras regiões com condições socioeconômicas e ambientais semelhantes (Costa et al., 2022).

2.4 Vulnerabilidade Socioeconômica: Índices, Desigualdades e Implicações para a Saúde Pública

A avaliação das condições socioeconômicas de populações constitui uma ferramenta essencial para a compreensão das desigualdades em saúde, exposição ambiental e vulnerabilidade social. Embora a literatura reconheça a vulnerabilidade social como um conceito multidimensional — englobando aspectos econômicos, culturais, demográficos e ambientais —, no presente estudo, adota-se um enfoque específico na dimensão socioeconômica. Essa delimitação considera variáveis como renda familiar, densidade domiciliar, acesso à educação e aos serviços de saúde, reconhecidas como componentes centrais em diversos índices desenvolvidos para mensurar vulnerabilidade (Bertolozzi et al., 2009).

Diversos índices têm sido utilizados com o objetivo de quantificar e classificar populações quanto ao seu grau de vulnerabilidade social. Entre os mais referenciados estão o Índice de Vulnerabilidade Social (IVS), desenvolvido no Brasil pelo Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), e o *Social Vulnerability Index* (SVI), desenvolvido nos Estados Unidos pelo *Centers for Disease Control and Prevention* (CDC). Ambos integram múltiplos fatores sociais, que incluem renda, escolaridade, composição familiar e acesso a transporte, permitindo identificar populações mais suscetíveis a riscos ambientais e de saúde (Flanagan et al., 2011; Costa & Marguti, 2015).

Ao concentrar-se nesse conjunto específico de fatores, tendo em vista que as Secretarias Municipais de Saúde (SEMSA) que cederam os dados para a presente pesquisa capturaram variáveis socioeconômicas, tais como renda, escolaridade, acesso a serviços de saúde e condição de moradia, cobrindo os três eixos principais do IVS, este estudo visa oferecer uma análise focada na vulnerabilidade socioeconômica, reconhecendo, contudo, sua interrelação com dimensões mais

amplas abordadas na literatura (Braveman et al., 2005; Bălan, 2013; Pleșa, 2013; Drachler et al., 2014; Julião & Lima, 2020).

Em nível estadual, o Índice Paulista de Vulnerabilidade Social (IPVS), desenvolvido pela Fundação SEADE, aplica metodologia semelhante, utilizando dados de renda, escolaridade, moradia e estrutura familiar para mapear áreas de maior vulnerabilidade no estado de São Paulo (SEADE, 2010).

Internacionalmente, uma ferramenta também muito utilizada é o *Socioeconomic Status Index* (SES Index), utilizado em diversos estudos epidemiológicos para estratificar populações de acordo com fatores socioeconômicos e avaliar disparidades em saúde pública (Braveman et al., 2005).

Estudos que utilizam esses índices abrangem uma variedade de áreas, incluindo:

- Epidemiologia e saúde pública, especialmente na análise de doenças crônicas e infecciosas (Braveman et al., 2005; Flanagan et al., 2011);
- Exposição ambiental e ocupacional, como vulnerabilidade a poluentes, radiação solar e desastres naturais (Modenese & Gobba, 2018; Kennedy et al., 2021);
- Planejamento urbano e políticas sociais, auxiliando na definição de áreas prioritárias para intervenções governamentais (SEADE, 2010; Costa & Marguti, 2015).

Tais metodologias têm se mostrado eficazes na identificação de populações em maior vulnerabilidade social, facilitando a formulação de políticas públicas voltadas à redução das desigualdades. No entanto, a aplicação desses índices em áreas geograficamente específicas, como a região amazônica, ainda é limitada, principalmente em função da heterogeneidade socioeconômica e das dificuldades logísticas locais. Esse cenário ressalta a necessidade de adaptações metodológicas que considerem as particularidades regionais, permitindo uma avaliação mais precisa das condições socioeconômicas e sua relação com fatores como a exposição à radiação UV e a adoção de práticas de fotoproteção.

Recentemente, pesquisas conduzidas nos Estados Unidos têm avaliado desigualdades no manejo e prognóstico de doenças associadas à exposição solar, como o melanoma de cabeça e pescoço. Esses estudos apontam que indivíduos provenientes de áreas com maior vulnerabilidade social apresentam piores desfechos clínicos e menor acesso a diagnóstico e tratamento oportunos, evidenciando a interação entre determinantes sociais da saúde e disparidades na atenção oncológica

(OlarTE & Megwalu, 2014). Complementarmente, Kennedy et al. (2021) desenvolveram índices específicos para identificar áreas de maior vulnerabilidade ao câncer de pele, considerando variáveis socioeconômicas e demográficas, o que reforça o potencial desses instrumentos na formulação de estratégias direcionadas à redução das desigualdades em saúde. A integração de ferramentas semelhantes no contexto brasileiro, especialmente em regiões marcadas por vulnerabilidades históricas como a Amazônia, pode oferecer subsídios importantes para o desenvolvimento de políticas públicas que promovam maior equidade no acesso à informação, aos recursos de fotoproteção e aos serviços de saúde especializados.

Ressalta-se, contudo, que o conceito de vulnerabilidade, amplamente empregado nas políticas públicas e nos estudos de saúde, não é isento de ambiguidades (Tedesco & Liberman, 2008). Como apontado por estudos recentes sobre a aplicabilidade do termo na Política Nacional de Assistência Social, há uma escassez de definições consensuais, sendo comum a utilização de vulnerabilidade como sinônimo de risco, o que pode gerar inconsistências na análise e na formulação de estratégias (Musial & Marcolino-Galli, 2019).

A luz desse arcabouço conceitual, optou-se por adotar, na presente pesquisa, uma perspectiva centrada na vulnerabilidade socioeconômica, delimitada por variáveis específicas como renda, escolaridade, densidade domiciliar e acesso a serviços essenciais e especializados em saúde. Reconhece-se, entretanto, que a complexidade conceitual do tema demanda reflexões contínuas, especialmente quando se busca adaptar instrumentos de avaliação a realidades locais heterogêneas, como a da região amazônica. Essa complexidade reforça a necessidade de abordagens metodológicas que considerem as particularidades regionais e as múltiplas dimensões da vulnerabilidade, contribuindo para a formulação de políticas públicas mais sensíveis às desigualdades sociais e ambientais (Paz et al., 2006; Sánchez & Bertolozzi, 2007; Bertolozzi et al., 2009).

2.5 Sensoriamento Remoto: Conceitos, Tecnologias e Aplicações Ambientais

O sensoriamento remoto (SR) é uma técnica de obtenção de informações sobre alvos na superfície terrestre e na atmosfera sem contato físico direto, utilizando a radiação eletromagnética (REM) como meio de interação. Essa abordagem permite a observação sistemática de grandes áreas da superfície do planeta, sendo amplamente empregada nas ciências ambientais, meteorologia,

geografia, hidrologia, geologia e gestão de recursos naturais (Prakash, 2000; Cracknell, 2007; Xie et al., 2008; Brandão et al., 2021).

Do ponto de vista físico, o SR baseia-se na interação da radiação com a matéria, que pode ser refletida, absorvida ou transmitida dependendo das propriedades ópticas do alvo. Essa radiação é registrada por sensores instalados em plataformas orbitais (como satélites), suborbitais (aeronaves, balões, drones) ou estacionárias. A REM captada é processada e convertida em informações quantitativas que descrevem características geo-biofísicas da superfície ou da atmosfera (Mohseni et al., 2022; Janga et al., 2023).

Os sensores utilizados podem ser classificados em duas categorias principais: passivos e ativos. Sensores passivos dependem da energia solar como fonte primária e captam a radiação refletida ou emitida pelos objetos. São exemplos os radiômetros, espectrômetros, espectro radiômetros e imageadores multiespectrais. Já os sensores ativos emitem sua própria fonte de energia, como radares (*Radio Detection and Ranging* – RADAR), altímetros a laser e sistemas LiDAR (*Light Detection and Ranging*), sendo capazes de operar independentemente da luz solar (Cracknell, 2007; Wang & Menenti, 2021).

O avanço do SR foi intensificado com o aumento do número de satélite de Observação da Terra (EO, sigla do inglês *Earth Observation*), o aprimoramento das ferramentas analíticas e a crescente disponibilidade de grandes volumes de dados (Bisneto Melo et al., 2021). Satélites como o Aura, da NASA, embarcam sensores como o *Ozone Monitoring Instrument* (OMI), responsáveis por estimativas globais de parâmetros atmosféricos relevantes, incluindo a TOC, COT e variáveis derivadas da irradiância solar, como a EDD, EDR e o UVI (Tanskanen et al., 2006).

O processamento digital das imagens envolve etapas como correção radiométrica e geométrica, realce espectral, extração de índices e classificação temática. No contexto atmosférico, permite gerar produtos com cobertura espacial e temporal consistentes, mesmo em regiões remotas ou de difícil acesso (Baptista, 2021; Janga et al., 2023).

Dentre suas aplicações, destacam-se o monitoramento da cobertura vegetal (Xie et al., 2008; Gao et al., 2020), da qualidade do ar (Bahadur et al., 2023; Leeuw et al., 2024), do uso da terra (Macarrigue et al., 2022; Wang et al., 2023) e dos processos atmosféricos (Gaida et al., 2020; Goyal et al., 2020; Zhu et al., 2021). No presente estudo, o uso do sensoriamento remoto foi essencial para suprir a ausência de medições diretas da radiação UV na região estudada. Os dados ambientais utilizados foram obtidos a partir de produtos de nível 3 do sensor OMI, com resolução

espacial de $1^\circ \times 1^\circ$, integrando estimativas modeladas da irradiância UV e de variáveis moduladoras da sua propagação na atmosfera.

Apesar de sua ampla aplicação, os produtos derivados do OMI estão sujeitos a fontes de incertezas inerentes ao sensoriamento remoto, que devem ser consideradas na análise e interpretação dos dados. Entre os principais fatores de erro, destacam-se os relacionados à geometria sol-sensor-atmosfera, sobretudo em condições de ângulos zenitais solares elevados, que aumentam o caminho óptico da radiação e podem ocasionar superestimções ou subestimções na coluna de ozônio (Arola et al., 2005; Bak et al., 2015). Adicionalmente, os diferentes ângulos de observação ao longo do campo de varredura do sensor introduzem distorções geométricas, especialmente nas bordas do campo de visada, afetando a acurácia espacial das medidas (Levelt et al., 2006).

A presença de nuvens e aerossóis também representa uma importante fonte de incerteza. As nuvens interferem na profundidade óptica e podem obscurecer a superfície, levando a erros superiores a 5–10% nas estimativas de irradiância UV (Tanskanen et al., 2006; Arola et al., 2009). De forma semelhante, aerossóis absorvedores, como poeira e fuligem, modificam a reflectância medida pelo sensor, impactando os algoritmos de inversão utilizados para estimar tanto o ozônio quanto a radiação UV incidente (Torres et al., 2007).

No âmbito instrumental, destaca-se a degradação óptica progressiva do OMI ao longo do tempo, especialmente nas faixas espectrais do ultravioleta e do visível, o que pode introduzir desvios sistemáticos caso não sejam aplicadas correções de calibração adequadas. Além disso, desde 2007, o sensor apresenta a chamada “anomalia de linha” (row anomaly), que compromete parte das leituras em linhas específicas do detector, resultando em dados inválidos ou corrompidos em determinados segmentos da varredura (Schenkeveld et al., 2017).

As limitações dos algoritmos de inversão também são relevantes, uma vez que as estimativas derivadas dependem de modelos de transferência radiativa que assumem perfis atmosféricos e de superfície padronizados. Tais simplificações nem sempre refletem a realidade local, sobretudo em regiões tropicais e de elevada heterogeneidade atmosférica, como a Amazônia (Tanskanen et al., 2006; Arola et al., 2009). Erros na caracterização do albedo da superfície ou na composição vertical dos gases atmosféricos podem afetar significativamente os resultados. Por fim, a resolução espacial dos produtos (cerca de 13×24 km no nadir, agregada para $1^\circ \times 1^\circ$ nos produtos de nível 3) pode ser insuficiente para capturar a variabilidade espacial de áreas pequenas ou com

uso e cobertura da terra diversificados, como é o caso da região sul do Amazonas (Hovila & Tamminen; 2013).

Ainda que os dados derivados do sensoriamento remoto apresentem limitações e incertezas — inerentes tanto aos sistemas de detecção quanto aos algoritmos de estimativa —, sua utilização permanece como uma alternativa viável e estratégica para regiões com ausência de estações de medição em superfície, como é o caso do sul do Amazonas. A escassez de observações in situ da irradiância UV compromete a validação direta dos modelos, mas, ao mesmo tempo, evidencia a importância de utilizar as estimativas orbitais como fonte preliminar de diagnóstico ambiental. Esses dados fornecem subsídios relevantes para a compreensão das dinâmicas espaciais e temporais da radiação UV na região, oferecendo indícios valiosos sobre padrões de sazonalidade e variabilidade atmosférica. No entanto, é urgente o investimento em infraestrutura científica voltada à instalação de sensores UV em superfície, o que possibilitaria tanto a calibração e o aprimoramento dos algoritmos de sensoriamento remoto quanto uma caracterização mais precisa e representativa das condições locais de exposição, fundamentais para subsidiar ações de saúde pública e mitigação de riscos ambientais.

2.6 Referências do Capítulo

- Abdel-Rahman, O. 2020. Prognostic impact of socioeconomic status among patients with malignant melanoma of the skin: a population-based study. *Journal of Dermatological Treatment*, **31**, 571–575. <https://doi.org/10.1080/09546634.2019.1657223>
- Aebi, C., et al., 2020. Estimation of cloud optical thickness, single scattering albedo and effective droplet radius using a shortwave radiative closure study in Payerne. *Atmospheric Measurement Techniques*, **13**, 907–923. <https://doi.org/10.5194/amt-13-907-2020>
- Al-Sadek, T. & Yusuf, N., 2024. Ultraviolet radiation biological and medical implications. *Current Issues in Molecular Biology*, **46**, 1924–1942. <https://doi.org/10.3390/cimb46030126>
- Araújo, M., et al., 2014. Natural melanin: A potential pH-responsive drug release device. *International journal of pharmaceutics*, **469**, 140–145. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2014.04.051>
- Arola, A., et al., 2005. Assessment of TOMS UV bias due to absorbing aerosols. *J. Geophys. Res.*, **110**, D23211. <https://doi.org/10.1029/2005JD005913>
- Arola, A., et al., 2009. A new approach to correct for absorbing aerosols in OMI UV. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L22805. <https://doi.org/10.1029/2009GL041137>

- Aun, M., et al., 2019. Daily, seasonal, and annual characteristics of UV radiation and its influencing factors in Tõravere, Estonia, 2004–2016. *Theoretical and Applied Climatology*, **138**, 887–897. <https://doi.org/10.1007/s00704-019-02865-1>
- Bahadur, F. T., et al. 2023. Applications of remote sensing vis-à-vis machine learning in air quality monitoring and modelling: a review. *Environmental Monitoring and Assessment*, **195**, 1502. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-12001-2>
- Bais, A. F., et al., 2019. Ozone–climate interactions and effects on solar ultraviolet radiation. *Photochemical & Photobiological Sciences*, **18**, 602–640. <https://doi.org/10.1039/c8pp90059k>
- Bak, J., et al., 2015. Validation of OMI total ozone retrievals from the SAO ozone profile algorithm and three operational algorithms with Brewer measurements, *Atmos. Chem. Phys.*, **15**, 667–683. <https://doi.org/10.5194/acp-15-667-2015>
- Bălan, M., 2013. A multidimensional analysis of social vulnerability. *Hyperion Economic Journal*, **1**, 30–39.
- Baptista, G. 2021. *Fundamentos de Sensoriamento Remoto*. Laboratório de Propulsão Digital. <https://dx.doi.org/10.6084/m9.figshare.15087123>
- Behar-Cohen, F., et al., 2013. Ultraviolet damage to the eye revisited: Eye-sun protection factor (E-SPF®), a new ultraviolet protection label for eyewear. *Clinical Ophthalmology*, **8**, 87–104. <https://doi.org/10.2147/OPTH.S46189>
- Benvenuto-Andrade, C., et al., 2005. Sun exposure and sun protection habits among high-school adolescents in Porto Alegre, Brazil. *Photochemistry and photobiology*, **81**, 630–635. <https://doi.org/10.1562/2005-01-25-ra-428>
- Bernhard, G. H., et al., 2023. Stratospheric ozone, UV radiation, and climate interactions. *Photochemical & Photobiological Sciences*, **22**, 937–989. <https://doi.org/10.1007/s43630-023-00371-y>
- Bertolozzi, M. R., et al., 2009. Os conceitos de vulnerabilidade e adesão na Saúde Coletiva. *Revista da Escola de Enfermagem da USP*, **43**, 1326–1330. <https://doi.org/10.1590/S0080-62342009000600031>
- Bisneto Melo, D. H., et al., 2021. Evolução da observação da terra por Sensoriamento Remoto. *Revista Brasileira de Sensoriamento Remoto*, **2**, 2–24. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5120454>
- Blumthaler, M., 2018. UV monitoring for public health. *International journal of environmental research and public health*, **15**, 1723. <https://doi.org/10.3390/ijerph15081723>
- Bornman, J. F., et al., 2019. Linkages between stratospheric ozone, UV radiation and climate change and their implications for terrestrial ecosystems. *Photochemical & Photobiological Sciences*, **18**, 681–716. <https://doi.org/10.1039/c8pp90061b>
- Brandão, M. B., et al., 2021. Sensoriamento Remoto e Estudos de Clima Urbano. *Ensaio e Ciência: Ciências Biológicas, Agrárias e da Saúde*, **25**, 195–199. <https://doi.org/10.17921/1415-6938.2021v25n2p195-199>
- Braveman, P. A., et al., 2005. Socioeconomic status in health research: one size does not fit all. *Jama*, **294**, 2879–2888. <https://doi.org/10.1001/jama.294.22.2879>

- Calbó, J., et al., 2005. Empirical studies of cloud effects on UV radiation: A review. *Reviews of Geophysics*, **43**, RG2002. <https://doi.org/10.1029/2004RG000155>
- Ceballos, A. G., et al., 2014. Exposição solar ocupacional e câncer de pele não melanoma: estudo de revisão integrativa. *Revista Brasileira de Cancerologia*, **60**, 251–258. <https://doi.org/10.32635/2176-9745.RBC.2014v60n3.472>
- Che, H., et al., 2015. Ground-based aerosol climatology of China: aerosol optical depths from the China Aerosol Remote Sensing Network (CARSNET) 2002–2013. *Atmos. Chem. Phys.*, **15**, 7619–7652. <https://doi.org/10.5194/acp-15-7619-2015>
- Coblentz, W. W., & Stair, R., 1933. Data on the spectral erythemic reaction of the untanned human skin to ultraviolet. *Bureau of Standards Journal of Research*, **12**, 13–14.
- Costa, M. A., & Marguti, B. O., 2015. *Atlas da vulnerabilidade social nos municípios brasileiros*. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA).
- Costa, R. C., et al., 2022. Incentivo à prevenção primária do câncer de pele na região amazônica: percepções acerca dos riscos e vulnerabilidades. *Research, Society and Development*, **11**, 1–9. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i6.29355>
- Cracknell, A. P., 2007. *Introduction to remote sensing*. CRC press.
- Damian, D. L., et al., 2011. An action spectrum for ultraviolet radiation-induced immunosuppression in humans. *British Journal of Dermatology*, **164**, 657–659. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2133.2010.10161.x>
- Dantas, M. M., et al., 2016. Estudo Ecológico das Interações por Neoplasias Malignas da Pele na Região Norte no Período de 2000 a 2014. *Revista Cereus*, **8**, 23–40.
- Diffey, B., 1994. Observed and predicted minimal erythema doses: a comparative study. *Photochemistry and photobiology*, **60**, 380–382. <https://doi.org/10.1111/j.1751-1097.1994.tb05119.x>
- Diffey, B. L., 1991. Solar ultraviolet radiation effects on biological systems. *Physics in medicine & biology*, **36**, 299–328. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/36/3/001>
- Diffey, B. L., 2002. Sources and measurement of ultraviolet radiation. *Methods*, **28**, 4–13. [https://doi.org/10.1016/S1046-2023\(02\)00204-9](https://doi.org/10.1016/S1046-2023(02)00204-9)
- Diffey, B. L., et al., 1997. The standard erythema dose: a new photobiological concept. *Photodermatology, photoimmunology & photomedicine*, **13**, 64–66. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0781.1997.tb00110.x>
- Drachler, M., et al., 2014. Desenvolvimento e validação de um índice de vulnerabilidade social aplicado a políticas públicas do SUS. *Ciência & Saúde Coletiva*, **19**, 3849–3858. <https://doi.org/10.1590/1413-81232014199.12012013>
- Eleftheratos, K., et al., 2020. Possible effects of greenhouse gases to ozone profiles and DNA active UV-B irradiance at ground level. *Atmosphere*, **11**, 228. <https://doi.org/10.3390/atmos11030228>
- Eleftheratos, K., et al., 2015. Ozone and spectroradiometric UV changes in the past 20 years over high latitudes. *Atmosphere-Ocean*, **53**, 117–125. <https://doi.org/10.1080/07055900.2014.919897>

- Erem, A. S., & Razzaque, M. S., 2021. Vitamin D-independent benefits of safe sunlight exposure. *The Journal of Steroid Biochemistry and Molecular Biology*, **213**, 105957. <https://doi.org/10.1016/j.jsbmb.2021.105957>
- Fanous, N., 2002. A new patient classification for laser resurfacing and peels: predicting responses, risks, and results. *Aesthetic plastic surgery*, **26**, 99–104. <https://doi.org/10.1007/s00266-002-1483-2>
- Ferlay, J., et al., 2021. Cancer statistics for the year 2020: An overview. *International journal of cancer*, **149**, 778–789. <https://doi.org/10.1002/ijc.33588>
- Fitzpatrick, T. B., 1986. Ultraviolet-induced pigmentary changes: benefits and hazards. *Current problems in dermatology*, **15**, 25–38. <https://doi.org/10.1159/000412090>
- Fitzpatrick, T. B., 1988. The validity and practicality of sun-reactive skin types I through VI. *Archives of dermatology*, **124**, 869–871. <https://doi.org/10.1001/archderm.124.6.869>
- Flanagan, B. E., et al., 2011. A social vulnerability index for disaster management. *Journal of homeland security and emergency management*, **8**, 1-22. <https://stacks.cdc.gov/view/cdc/10.2202/1547-7355.1792>
- Fors, M., et al., 2020. Validity of the Fitzpatrick Skin Phototype Classification in Ecuador. *Advances in Skin & Wound Care*, **33**, 1-5. <https://doi.org/10.1097/01.ASW.0000721168.40561.a3>
- Fountoulakis, I., et al., 2021. Variability and trends in surface solar spectral ultraviolet irradiance in Italy: on the influence of geopotential height and lower-stratospheric ozone. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **21**, 18689–18705. <https://doi.org/10.5194/acp-21-18689-2021>
- Franco, J. M., et al., 2016. Exposição do trabalhador rural à radiação ultravioleta: estudo no sul de minas gerais. *Revista Brasileira de Climatologia*, **18**, 53-62. <https://doi.org/10.5380/abclima.v18i0.43651>
- Fu, R., Yin, L., et al., 2013. Increased dry-season length over southern Amazonia in recent decades and its implication for future climate projection. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, **110**, 18110-18115. <https://doi.org/10.1073/pnas.1302584110>
- Gaida, W., et al., 2020. Correção atmosférica em sensoriamento remoto: uma revisão. *Revista Brasileira de Geografia Física*, **13**, 229–248. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v13.1.p229-248>
- Gao, L., et al., 2020. Remote sensing algorithms for estimation of fractional vegetation cover using pure vegetation index values: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **159**, 364–377. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.11.018>
- Garnelo, L., et al., 2020. Barriers to access and organization of primary health care services for rural riverside populations in the Amazon. *International Journal for Equity in Health*, **19**, 1–14. <https://doi.org/10.1186/s12939-020-01171-x>
- Ghissassi, F. E., et al., 2009. A review of human carcinogens – Part D: radiation. *The Lancet Oncology*, **10**, 751–752. [https://doi.org/10.1016/S1470-2045\(09\)70213-X](https://doi.org/10.1016/S1470-2045(09)70213-X)
- Gies, P., et al., 2018. Review of the global solar UV index 2015 workshop report. *Health physics*, **114**, 84–90. <https://doi.org/10.1097/HP.0000000000000742>

- Girard, P. M., et al., 2011. UVA-induced damage to DNA and proteins: direct versus indirect photochemical processes. *Journal of Physics: Conference Series*, **261**, 012002. <https://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/261/1/012002>
- Goldman, M. P., 2008. *Universal classification of skin type*. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-71097-4_3
- Gómez, J. M., 2024. La radiación solar en extremo ultravioleta: implicaciones en la atmósfera de la Tierra. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, **46**, e20230212. <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2023-0212>
- Gómez, J. M., et al., 2018. A irradiância solar: conceitos básicos. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, **40**, e3312. <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2017-0342>
- Goyal, M. K., et al., 2020. Remote sensing and GIS applications in sustainability. *Sustainability: fundamentals and applications* (Chapter 28), John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781119434016.ch28>
- Gupta, V., & Sharma, V. K., 2019. Skin typing: Fitzpatrick grading and others. *Clinics in dermatology*, **37**, 430–436. <https://doi.org/10.1016/j.clindermatol.2019.07.010>
- Häder, D.-P., et al., 2007. Effects of solar UV radiation on aquatic ecosystems and interactions with climate change. *Photochemical & photobiological sciences*, **6**, 267–285. <https://doi.org/10.1039/b700020k>
- Halliday, G. M., et al., 2011. Ultraviolet A radiation: its role in immunosuppression and carcinogenesis. *Seminars in cutaneous medicine and surgery*, **30**, 214–221. <https://doi.org/10.1016/j.sder.2011.08.002>
- Hovila, J., Arola, A., & Tamminen, J., 2013. OMI/Aura Surface UVB Irradiance and Erythral Dose Daily L3 Global Gridded 1.0 degree x 1.0 degree V3. *OMI/Aura Surface UVB Irradiance and Erythral Dose Daily L3 Global Gridded 1.0 degree x 1.0 degree V3*.
- Hussein, M. R., 2005. Ultraviolet radiation and skin cancer: molecular mechanisms. *Journal of cutaneous pathology*, **32**, 191–205. <https://doi.org/10.1111/j.0303-6987.2005.00281.x>
- IBGE, 2020. *Conheça o Brasil - População: cor ou raça*. <https://educa.ibge.gov.br/jovens/conheca-o-brasil/populacao/18319-cor-ou-raca.html>. (Acessado em 23 de fevereiro de 2024).
- ICNIRP, 2004. Guidelines on limits of exposure to ultraviolet radiation of wavelengths between 180 nm and 400 nm (incoherent optical radiation). *Health Physics*, **87**, 171–186. <https://doi.org/10.1097/00004032-200408000-00006>
- INCA, 2019. *Estimativa 2020: incidência de câncer no Brasil*. Rio de Janeiro, Brazil: INCA.
- INCA, 2022. *Estimativa 2023: incidência de câncer no Brasil*. Rio de Janeiro, Brazil: INCA.
- INCA, 2024. *Atlas On-line de Mortalidade*. <https://mortalidade.inca.gov.br/MortalidadeWeb/>. (Acessado em 20 janeiro de 2024).
- ISO, 2024. *Photocarcinogenesis action spectrum (non-melanoma skin cancers)*, Standard ISO/CIE 28077: 2024 (E). ISO Geneva.
- Janga, B., et al., 2023. A Review of Practical AI for Remote Sensing in Earth Sciences. *Remote Sensing*, **15**, 4112. <https://doi.org/10.3390/rs15164112>

- Jebar, M. A., et al., 2020. Influence of clouds on OMI satellite total daily UVA exposure over a 12-year period at a southern hemisphere site. *International Journal of Remote Sensing*, **41**, 272-283. <https://doi.org/10.1080/01431161.2019.1641243>
- Julião, C. C., & Lima, J. E., 2020. Índice de vulnerabilidade social: uma aplicação de análise fatorial para classificar os municípios pernambucanos. *Planejamento e Políticas Públicas*, **54**, 12-28. <http://dx.doi.org/10.38116/ppp54art01>
- Juzeniene, A., & Moan, J., 2012. Beneficial effects of UV radiation other than via vitamin D production. *Dermato-endocrinology*, **4**, 109-117. <https://doi.org/10.4161/derm.20013>
- Juzeniene, A., et al., 2011. Solar radiation and human health. *Reports on Progress in Physics*, **74**, 066701. <http://dx.doi.org/10.1088/0034-4885/74/6/066701>
- Kennedy, C., et al., 2021. Developing indices to identify hotspots of skin cancer vulnerability among the Non-Hispanic White population in the United States. *Annals of epidemiology*, **59**, 64-71. <https://doi.org/10.1016/j.annepidem.2021.04.004>
- Kerr, J. B., 2005. Understanding the factors that affect surface ultraviolet radiation. *Optical Engineering*, **44**, 041002. <https://doi.org/10.1117/1.1886817>
- Kerr, J. B., & McElroy, C. T., 1993. Evidence for large upward trends of ultraviolet-B radiation linked to ozone depletion. *Science*, **262**, 1032-1034. <https://doi.org/10.1126/science.262.5136.1032>
- Kumar, H. D., & Häder, D.-P., 2012. *Global aquatic and atmospheric environment*. Springer Science & Business Media.
- Lancer, H. A., 1998. Lancer ethnicity scale (LES). *Lasers Surg. Med.*, **22**, 9. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1096-9101\(1998\)22:1%3C9::aid-lsm4%3E3.0.co;2-t](https://doi.org/10.1002/(sici)1096-9101(1998)22:1%3C9::aid-lsm4%3E3.0.co;2-t)
- Leeuw, G., et al., 2024. Remote sensing of air pollutants in China to study the effects of emission reduction policies on air quality. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, **265**, 106392. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2024.106392>
- Leite-Filho, A. T., et al., 2019. The southern Amazon rainy season: The role of deforestation and its interactions with large-scale mechanisms. *International Journal of Climatology*, **40**, 1-14. <https://doi.org/10.1002/joc.6335>
- Leopoldino, G. L., & Gonçalves, J. C., 2019. Câncer de pele no Brasil e no estado do Piauí: estimativa da incidência, diagnóstico e custos com tratamento. *Boletim Informativo Geum*, **10**, 1-11.
- Levelt, P. F. et al., 2006. The ozone monitoring instrument. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **44**, 1093-1101. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.872333>
- Li, Z., et al., 2016. Aerosol and monsoon climate interactions over Asia. *Reviews of Geophysics*, **54**, 866-929. <https://doi.org/10.1002/2015RG000500>
- Liou, K.-N., 2002. *An introduction to atmospheric radiation* (Vol. 84). Elsevier.
- Löfgren, S., 2017. Solar ultraviolet radiation cataract. *Experimental eye research*, **156**, 112-116. <https://doi.org/10.1016/j.exer.2016.05.026>
- Lucas, R. M., et al., 2015. Ultraviolet radiation, vitamin D and multiple sclerosis. *Neurodegenerative disease management*, **5**, 413-424. <https://doi.org/10.2217/nmt.15.33>

- Macarringue, L. S., et al., 2022. Developments in land use and land cover classification techniques in remote sensing: A review. *Journal of Geographic Information System*, **14**, 1–28. <https://doi.org/10.4236/jgis.2022.141001>
- Madronich, S., et al., 1998. Changes in biologically active ultraviolet radiation reaching the Earth's surface. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, **46**, 5–19. [https://doi.org/10.1016/S1011-1344\(98\)00182-1](https://doi.org/10.1016/S1011-1344(98)00182-1)
- Madronich, S., et al., 2018. Response of Surface Ultraviolet and Visible Radiation to Stratospheric SO₂ Injections. *Atmosphere*, **9**, 432. <https://doi.org/10.3390/atmos9110432>
- McConnell, J. C., et al., 1992. Photochemical bromine production implicated in Arctic boundary-layer ozone depletion. *Nature*, **355**, 150–152. <https://doi.org/10.1038/355150a0>
- McKinlay, A. F., & Diffey, B. L., 1987. A reference action spectrum for ultraviolet induced erythema in human skin. In W. F. Passchier & B. F. M. Bosnjakovic (Eds.), *Human exposure to ultraviolet radiation: Risks and regulations* (pp. 83-87). Elsevier Science Publishers.
- Mélo, K., Santos, A., Amorim, J., Fernandes, T. M., & Souza, C. F. (2019). Análise temporal da mortalidade por cancer de pele melanona no Brasil: 2000 a 2016. *Surgical & Cosmetic Dermatology*, **11**, 287-294. <https://doi.org/10.5935/scd1984-8773.20191141486>
- Mesquita, L. G., et al., 2020. Câncer de pele e renda familiar: um estudo ecológico. *Revista Brasileira de Cancerologia*, **66**, e-07949. <https://doi.org/10.32635/2176-9745.RBC.2020v66n4.949>
- Miguel, A., et al., 2011. Evolution of erythemal and total shortwave solar radiation in Valladolid, Spain: Effects of atmospheric factors. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, **73**, 578-586. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2010.11.021>
- Modenese, A., & Gobba, F., 2018. Occupational exposure to solar radiation at different latitudes and pterygium: a systematic review of the last 10 years of scientific literature. *International journal of environmental research and public health*, **15**, 37. <https://doi.org/10.3390/ijerph15010037>
- Mohseni, F., et al., 2022. Ocean water quality monitoring using remote sensing techniques: A review. *Marine environmental research*, **180**, 105701. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2022.105701>
- Musial, D. C., & Marcolino-Galli, J. F., 2019. Vulnerabilidade e risco: apontamentos teóricos e aplicabilidade na Política Nacional de Assistência Social. *O social em questão*, **21**, 291–306.
- Okuno, E., & Vilela, M. C., 2005. *Radiação Ultravioleta: características e efeitos*. Livraria da Física.
- Olarte, L. S., & Megwalu, U. C., 2014. The impact of demographic and socioeconomic factors on major salivary gland cancer survival. *Otolaryngology–Head and Neck Surgery*, **150**, 991–998. <https://doi.org/10.1177/0194599814526556>
- Passeron, T., et al., 2021. Photoprotection according to skin phototype and dermatoses: practical recommendations from an expert panel. *Journal of the European Academy of Dermatology and Venereology*, **35**, 1460–1469. <https://doi.org/10.1111/jdv.17242>

- Pathak, M. A., et al., 1976. Sunlight and melanin pigmentation. *Photochemical and Photobiological Reviews*, **1**, 211–239. https://doi.org/10.1007/978-1-4684-2574-1_5
- Paz, A., et al., 2006. Vulnerabilidade e envelhecimento no contexto da saúde. *Acta Paulista de Enfermagem*, **19**, 338-342. <https://doi.org/10.1590/S0103-21002006000300014>
- Pires, D. A., et al., 2016. Estudo ecológico das internações por neoplasias malignas da pele na região norte no período de 2000 a 2014. *Revista Cereus*, **8**, 23–40.
- Pleşa, R., 2013. Social exclusion and vulnerable populations. *Annals of the University of Petroşani. Economics*, **13**, 173–180.
- Prakash, A., 2000. Thermal remote sensing: concepts, issues and applications. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, **33**, 239–243.
- Quan, Q.-L., et al., 2023. Impact of ultraviolet radiation on cardiovascular and metabolic disorders: The role of nitric oxide and vitamin D. *Photodermatology, Photoimmunology & Photomedicine*, **39**, 573–581. <https://doi.org/10.1111/phpp.12914>
- Rigel, D. S., et al., 2022. Photoprotection for all: Current gaps and opportunities. *Journal of the American Academy of Dermatology*, **86**, S18–S26. <https://doi.org/10.1016/j.jaad.2021.12.023>
- Rizzatti, K., et al., 2011. Perfil epidemiológico dos cidadãos de Florianópolis quanto à exposição solar. *Epidemiologia e Serviços de Saúde*, **20**, 459–469. <http://dx.doi.org/10.5123/S1679-49742011000400005>
- Roberts, W. E., 2008. The Roberts Skin Type Classification System. *Journal of drugs in dermatology: JDD*, **7**, 452–456.
- Sage, E., et al., 2012. Unravelling UVA-induced mutagenesis. *Photochemical & Photobiological Sciences*, **11**, 74–80. <https://doi.org/10.1039/c1pp05219e>
- Sánchez, A. I., & Bertolozzi, M., 2007. Pode o conceito de vulnerabilidade apoiar a construção do conhecimento em saúde coletiva? *Ciência & Saúde Coletiva*, **12**, 319-324. <https://doi.org/10.1590/S1413-81232007000200007>
- Santos, M., et al., 2023. Estimativa de incidência de câncer no Brasil, 2023-2025. *Revista Brasileira de Cancerologia*, **69**, e-213700. <https://doi.org/10.32635/2176-9745.RBC.2023v69n1.3700>
- Saucedo, G. M., et al., 2020. Effects of solar radiation and an update on photoprotection. *Anales de Pediatría (English Edition)*, **92**, 377e1-377e9. <https://doi.org/10.1016/j.anpedi.2020.04.014>
- SBD, 2021a. *Dezembro Laranja: Campanha de prevenção ao câncer de pele*. Sociedade Brasileira de Dermatologia. <https://sbd.org.br/campanha/dezembrolaranja/>. (Acessado em 10 de janeiro de 2024).
- SBD, 2021b. *Sob o sol com saúde e bem-estar: guia de fotoproteção da Sociedade Brasileira de Dermatologia*. <https://issuu.com/sbd.br/docs/sbd-guiafotoprotecao>. (Acessado em 10 de fevereiro de 2024).
- Schenkeveld, V. M. E., et al., 2017. In-flight performance of the Ozone Monitoring Instrument. *Atmos Meas Tech*, **10**, 1957-1986. <https://doi.org/10.5194/amt-2016-420>

- Schmalwieser, A. W., et al., 2022. UV-Biometer - The usage of erythmal weighted broadband meters for other biological effects. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, **230**, 112442. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2022.112442>
- SEADE, F., 2010. *Índice Paulista de Vulnerabilidade Social-IPVS*. https://repositorio.seade.gov.br/dataset/social/resource/35c74698-a368-4f0c-8f14-3694896a9d74?inner_span=True. (Acessado em 10 de janeiro de 2025).
- Silva, A. A., 2013. Erythmal dose rate under noon overcast skies. *Photochemical & Photobiological Sciences*, **12**, 777-786. <https://doi.org/10.1039/c2pp25330e>
- Silva, S. L., et al., 2020. Câncer de pele na região Norte do Brasil: levantamento das notificações de 2014-2019 pela plataforma DATASUS. *Revista Cereus*, **12**, 198–211.
- Sirithian, D., & Thanatrakolsri, P., 2022. Relationships between Meteorological and Particulate Matter Concentrations (PM2.5 and PM10) during the Haze Period in Urban and Rural Areas, Northern Thailand. *Air; Soil and Water Research*, **15**, 2-15. <https://doi.org/10.1177/11786221221117264>
- Sola, Y., & Lorente, J., 2015. Contribution of UVA irradiance to the erythema and photoaging effects in solar and sunbed exposures. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, **143**, 5–11. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2014.10.024>
- Solomon, S., et al., 1986. On the depletion of Antarctic ozone. *Nature*, **321**, 755–758. <https://doi.org/10.1038/321755a0>
- Sousa, C. T., et al., 2020. Ozone trends on equatorial and tropical regions of South America using Dobson spectrophotometer, TOMS and OMI satellites instruments. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, **203**, 105272. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105272>
- Souza, R. J., et al., 2011. Estimativa do custo do tratamento do câncer de pele tipo não-melanoma no Estado de São Paulo-Brasil. *Anais Brasileiros de Dermatologia*, **86**, 657–662. <https://doi.org/10.1590/S0365-05962011000400005>
- Sung, H., et al., 2021. Global cancer statistics 2020: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries. *CA Cancer J Clin.*, **71**, 209-249. <https://doi.org/10.3322/caac.21660>
- Szkló, A. S., et al., 2007. Comportamento relativo à exposição e proteção solar na população de 15 anos ou mais de 15 capitais brasileiras e Distrito Federal, 2002-2003. *Cadernos de Saúde Pública*, **23**, 823–834. <https://doi.org/10.1590/S0102-311X2007000400010>
- Tanskanen, A., et al., 2006. Surface ultraviolet irradiance from OMI. *IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **44**, 1267–1271. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2005.862203>
- Taylor, S. C., et al., 2005. The Taylor Hyperpigmentation Scale: a new visual assessment tool for the evaluation of skin color and pigmentation. *Cutis*, **76**, 270-274.
- Tedesco, S., & Liberman, F., 2008. O que fazemos quando falamos em vulnerabilidade. *O Mundo da Saúde*, **32**, 254–260.
- Torres, O., et al., 2007. Aerosols and Surface UV products from Ozone Monitoring Instrument observations: An overview. *J. Geophys. Res.*, **112**, D24547. <https://doi.org/10.1029/2007JD008809>

- Tsekeri, A., et al., 2017. Profiling aerosol optical, microphysical and hygroscopic properties in ambient conditions by combining in situ and remote sensing. *Atmos. Meas. Tech.*, **10**, 83–107. <https://doi.org/10.5194/amt-10-83-2017>
- Ullrich, S. E., 2005. Mechanisms underlying UV-induced immune suppression. *Mutat. Res.*, **571**, 185–205. <https://doi.org/10.1016/j.mrfmmm.2004.06.059>
- Wang, J., et al., 2016. Amazon boundary layer aerosol concentration sustained by vertical transport during rainfall. *Nature*, **539**, 416–419. <https://doi.org/10.1038/nature19819>
- Wang, Y., et al., 2023. A review of regional and Global scale Land Use/Land Cover (LULC) mapping products generated from satellite remote sensing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **206**, 311–334. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2023.11.014>
- Wang, Z., & Menenti, M., 2021. Challenges and opportunities in Lidar remote sensing. *Frontiers in Remote Sensing*, **2**, 641723. <https://doi.org/10.3389/frsen.2021.641723>
- Webb, A. R., et al., 2011. Know your standard: clarifying the CIE erythema action spectrum. *Photochemistry and photobiology*, **87**, 483–486. <https://doi.org/10.1111/j.1751-1097.2010.00871.x>
- WHO, World Health Organization, 2002. *Global solar UV index : a practical guide*. WHOLIS.
- WMO, World Meteorological Organization, 1998. *Report of the WMO-WHO Meeting of Experts on Standardization of UV Indices and Their Dissemination to the Public*.
- Xie, Y., et al., 2008. Remote sensing imagery in vegetation mapping: a review. *Journal of plant ecology*, **1**, 9–23. <https://doi.org/10.1093/jpe/rtm005>
- Young, A. R., et al., 2017. Ultraviolet radiation and the skin: Photobiology and sunscreen photoprotection. *Journal of the American Academy of Dermatology*, **76**, S100–S109. <https://doi.org/10.1016/j.jaad.2016.09.038>
- Zerefos, C. S., et al., 1995. A note on the recent increase of solar UV-B radiation over northern middle latitudes. *Geophysical Research Letters*, **22**, 1245–1247. <https://doi.org/10.1029/95GL01187>
- Zhu, Z., et al., 2021. Atmospheric light estimation based remote sensing image dehazing. *Remote Sensing*, **13**, 2432. <https://doi.org/10.3390/rs13132432>

CAPÍTULO 3

3 VARIAÇÕES SAZONAIS E TENDÊNCIAS DA IRRADIÂNCIA ESPECTRAL SOLAR UV COM BASE EM DADOS DO OZONE MONITORING INSTRUMENT AO MEIO-DIA SOLAR NO SUL DO AMAZONAS, BRASIL

Neste capítulo, publicado na revista *Remote Sensing Applications: Society and Environment* (Volume 37, janeiro de 2025, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2024.101423>), são apresentados dados obtidos a partir de instrumentos embarcados em satélites, explorando-se como essas informações contribuem para o entendimento da complexa distribuição espacial e temporal da irradiância UV em regiões onde o monitoramento de superfície é limitado ou inexistente. A partir de uma abordagem baseada em sensoriamento remoto, o capítulo oferece uma análise detalhada sobre o impacto de variáveis atmosféricas – como a Espessura Óptica das Nuvens (COT, sigla do inglês *Cloud Optical Thickness*) e a Coluna Total de Ozônio (TOC, sigla do inglês *Total Ozone Column*), na modulação da irradiância UV, proporcionando uma compreensão mais aprofundada dos mecanismos que influenciam sua variabilidade na região sul do Amazonas.

3.1 Materiais e Métodos

3.1.1 Descrição da área de estudo

O estudo foi realizado na mesorregião sul do estado do Amazonas, abrangendo os municípios de Boca do Acre (21,9 mil km²), Lábrea (68,3 mil km²), Humaitá (33,1 mil km²), Manicoré (48,3 mil km²), Novo Aripuanã (41,2 mil km²) e Apuí (54,2 mil km²) (Figura 3-1). Essa região possui uma população de aproximadamente 236 mil habitantes, distribuída da seguinte forma: Boca do Acre com 35.447 habitantes, Lábrea com 45.448 habitantes, Humaitá com 57.473 habitantes, Manicoré com 53.914 habitantes, Novo Aripuanã com 23.818 habitantes e Apuí com 20.647 habitantes (IBGE, 2022).

De acordo com a classificação climática de Köppen, a mesorregião sul do Amazonas apresenta predominantemente clima tropical de monção (Am), caracterizado por três períodos distintos: chuvoso, seco e de transição. Durante o período chuvoso (outubro a abril), a convergência de umidade proveniente da Amazônia e a atuação de sistemas meteorológicos, como a Zona de

Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), promovem elevados índices pluviométricos, com precipitação anual superior a 1.500 mm (Franca & Mendonça, 2016; Limberger & Silva, 2016; Martins et al., 2023). No período seco (junho a agosto), observa-se uma redução das chuvas em função da diminuição da atividade convectiva e da influência do anticiclone subtropical do Atlântico Sul, com médias pluviométricas inferiores a 60 mm (Martins et al., 2023). O período de transição (maio e setembro) marca o início e o fim da estação seca, em decorrência de mudanças graduais nas condições atmosféricas. As temperaturas médias anuais variam entre 25 e 27 °C. A umidade relativa do ar oscila entre 85 e 90 %, com valores mínimos inferiores a 50 % durante o período seco (Martins et al., 2023).

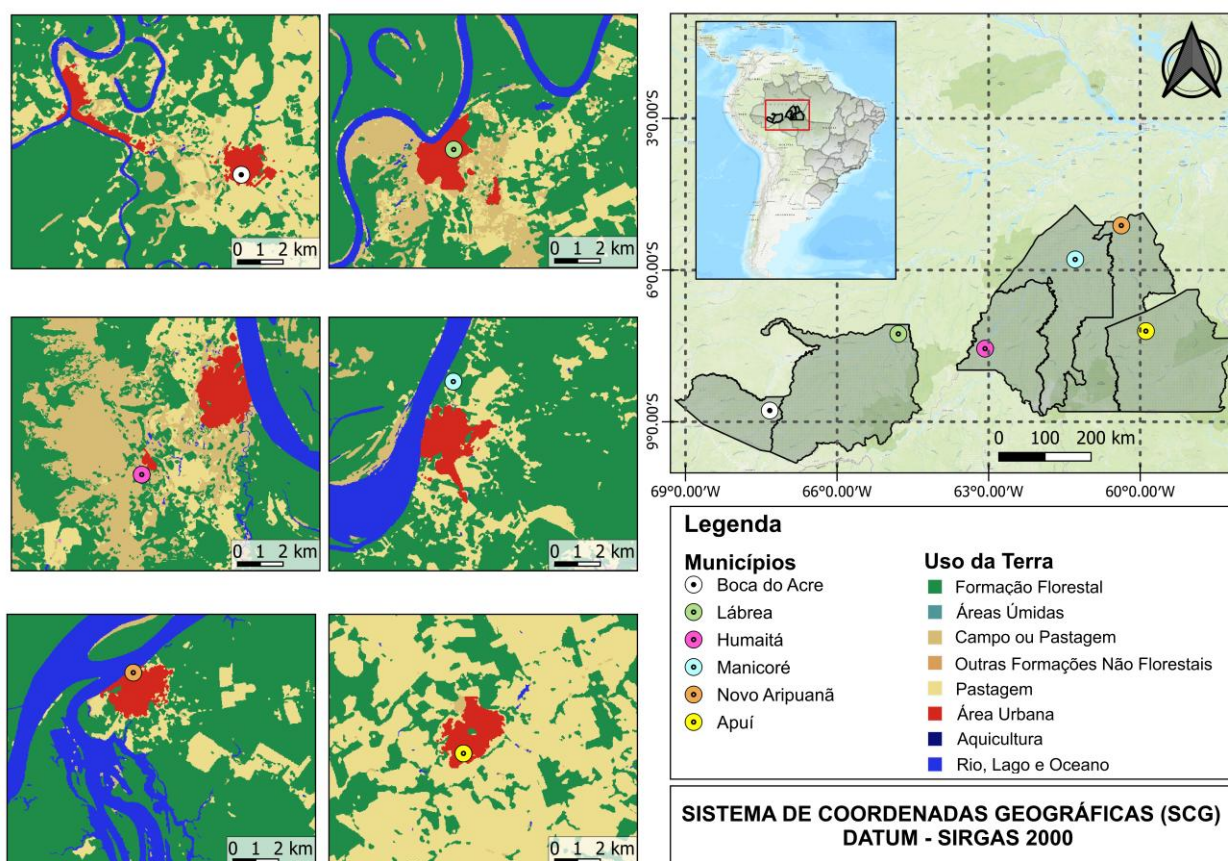


Figura 3-1 - Localização da área de estudo, mostrando a distribuição espacial do uso e cobertura da terra na região, com ênfase nas áreas urbanas.

3.1.2 Instrumentos

Os dados utilizados neste estudo foram obtidos a partir do Instrumento de Monitoramento de Ozônio (OMI, sigla do inglês *Ozone Monitoring Instrument*) e do Serviço de Monitoramento da Atmosfera Copernicus (CAMS).

- **Ozone Monitoring Instrument (OMI)**

O satélite Aura, parte do *Earth Observing System* (EOS) da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), foi lançado em 2004. Ele orbita a Terra em órbitas polares sincronizadas com o Sol, a uma altitude de 705 km, cruzando o equador às $13h45 \pm 15$ minutos (Levelt et al., 2006; Tanskanen et al., 2006). A bordo do Aura encontra-se o OMI, um sensor que incorpora dois espectrômetros de imagem com visualização nadir, cobrindo comprimentos de onda de 270 a 500 nm, com resolução espectral de 0,5 nm. Esse sensor mede tanto a radiação solar direta quanto a radiação refletida pela Terra, em faixas de 2.600 km de largura, perpendiculares à direção de voo do satélite Aura (Tanskanen et al., 2006).

As medições de radiação obtidas pelo OMI são processadas por meio de um algoritmo de superfície, desenvolvido com base no algoritmo UV do Espectrômetro de Mapeamento de Ozônio Total (TOMS, sigla do inglês *Total Ozone Mapping Spectrometer*), para derivar parâmetros atmosféricos como a TOC, a Refletância Equivalente de Lambert (LER, sigla do inglês *Lambertian Equivalent Reflectivity*) e a COT (Eck et al., 1995; Herman et al., 1999; Herman et al., 2001; Stammes & Noordhoek, 2002; Silva & Tomaz, 2012).

O cálculo do algoritmo envolve duas etapas principais: inicialmente, determina-se a irradiância solar UV incidente na superfície terrestre sob condições de céu claro, ou seja, sem a presença de nuvens e aerossóis na atmosfera, assumindo a superfície da Terra como um refletor lambertiano (Krotkov et al., 1998). Em seguida, são incorporadas correções para a presença de nuvens e aerossóis, sejam eles absorventes ou não absorventes (Tanskanen et al., 2006; Stammes & Noordhoek, 2002).

A irradiância UV na superfície, corrigida para a presença de nuvens, é obtida por meio de modelagem de transferência radiativa, a qual considera nuvens homogêneas e plano-paralelas inseridas em uma atmosfera molecular com espalhamento e absorção de ozônio (Tanskanen et al., 2006). Nesse contexto, assume-se que a COT é espectralmente uniforme. Além disso, a Espessura Óptica Efetiva das Nuvens é determinada pelo ajuste entre as radiâncias calculadas e aquelas medidas pelo OMI no comprimento de onda de 360 nm (Tanskanen, 2004). Esse modelo não leva

em consideração os efeitos tridimensionais das nuvens nem a heterogeneidade do relevo (Tanskanen et al., 2006; Stammes & Noordhoek, 2002).

A correção para aerossóis absorventes no OMI envolve o uso de um Índice de Aerossóis (AI, sigla do inglês *Aerosol Index*) combinado com um fator de conversão dependente da distribuição e do tipo de aerossol. Essa correção é aplicada pelo algoritmo quando o AI é superior a 0,5 e a refletância a 360 nm é inferior a 0,15. No entanto, o algoritmo não considera a camada limite atmosférica (a porção inferior da troposfera), o que implica na exclusão de aerossóis absorventes, como fumaça e poeira, resultando em uma superestimação da irradiância UV na superfície. Para aerossóis não absorventes, a correção é implementada de forma semelhante àquela utilizada para as nuvens (Tanskanen et al., 2006; Stammes & Noordhoek, 2002).

Assim, os principais produtos derivados do OMI incluem a irradiâncias UV na superfície nos comprimentos de onda de 305, 310, 324 e 380 nm, a irradiância ponderada pelo espectro de ação eritêmico, a dose diária eritêmica, o Índice UV e a Espessura Óptica das Nuvens (Tanskanen et al., 2006; Stammes & Noordhoek, 2002). Cabe destacar que, embora os produtos derivados do OMI frequentemente sejam descritos como representativos das condições do meio-dia solar, as medições reais são realizadas no nadir local durante a passagem única do satélite, que ocorre por volta das 13h30 no horário solar local. Assim, os dados não correspondem exatamente ao meio-dia solar verdadeiro, mas sim a um horário próximo, sendo posteriormente ajustados por modelagem para estimar as condições típicas desse momento do dia.

- **Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS)**

O CAMS é uma iniciativa da União Europeia, coordenado pelo *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), com o objetivo de fornecer informações contínuas sobre a composição atmosférica global. O CAMS desempenha um papel fundamental no monitoramento e na previsão da qualidade do ar, do clima e da radiação UV, além de analisar o impacto dos gases de efeito estufa e de outros poluentes na atmosfera (Inness et al., 2019).

O CAMS utiliza uma combinação de modelos numéricos de previsão do tempo com observações por satélite e de superfície para fornecer dados precisos e atualizados. A iniciativa abrange uma ampla gama de parâmetros atmosféricos, incluindo concentrações de O₃, dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), monóxido de carbono (CO), dióxido de enxofre (SO₂), entre outros. Além disso, o CAMS disponibiliza produtos operacionais voltados ao monitoramento da qualidade do ar, por meio de previsões diárias de poluentes atmosféricos, como ozônio troposférico, material

particulado (PM_{2.5} e PM₁₀) e dióxido de nitrogênio (NO₂), em escala global e europeia (Inness et al., 2019; Ceccato et al., 2021).

O CAMS envolve a assimilação de dados de sensores satelitais e de superfície em modelos atmosféricos. Os satélites fornecem cobertura global e contínua, enquanto as observações realizadas em solo oferecem dados mais detalhados e específicos. De forma semelhante ao OMI, o CAMS também utiliza modelagem de transferência radiativa para calcular a distribuição da radiação solar e terrestre na atmosfera, considerando as interações com gases, aerossóis e nuvens (Peuch et al., 2022).

3.1.3 Coleta e processamento de dados

As irradiâncias UV (305, 310, 324 e 380 nm) e a Espessura Óptica das Nuvens (COT) foram obtidas a partir do produto *OMI/Aura Surface UVB Irradiance and Erythemal Dose Daily L3 Global Gridded 1.0° × 1.0° V3* (OMUVBd) (Hovila et al., 2013). O conjunto de dados foi acessado por meio da plataforma do NASA *Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center* (GES DISC), disponível em: https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/OMUVBd_003/summary?keywords=UV%20index.

Após realizar o login, realizou-se o acesso a seção *Data Access* e selecionou-se a opção *Subset/Get Data*. Nesta etapa, o *Download Method* foi configurado utilizando o *GES DISC Subsetter*, que permite a busca e o recorte geoespacial, a seleção de variáveis e a reestruturação dos dados no formato NetCDF. Para as *Method Options*, definiu-se a área de estudo e o intervalo temporal (de 1 de janeiro de 2005 a 31 de dezembro de 2022), além da seleção das variáveis de interesse. Por fim, aplicou-se a interpolação bilinear (*Bilinear Interpolation*) para reestruturar os dados em uma grade de 0,25° × 0,25°.

Todos os detalhes técnicos referentes a este e a outros métodos de interpolação foram baseados na documentação da ferramenta *Climate Data Operator* (CDO), versão 1.9.6, disponível em: <https://code.mpimet.mpg.de/projects/cdo/embedded/cdo.pdf>. Após a aplicação de todos os filtros, obteve-se por meio do *Get Data*, uma lista com 6.548 links web, armazenados em um arquivo .txt, para download dos dados.

Utilizando *Shell Scripts* no terminal Linux, foi realizado o download de todas as imagens associadas aos links web previamente gerados. Em seguida, os dados — originalmente

disponibilizados com frequência diária para o horário solar local do meio-dia em todos os pontos da grade — foram processados para obter médias mensais referentes a toda a área de estudo.

As variáveis Coluna Total de Ozônio (TOC), Coluna Total de Vapor d'Água (TCWV), Profundidade Óptica de Aerossóis por Matéria Orgânica a 550 nm (OMAOD550), Material Particulado com diâmetro inferior a 2,5 μm ($\text{PM}_{2.5}$), Material Particulado com diâmetro inferior a 10 μm (PM_{10}) e Profundidade Óptica Total de Aerossóis a 550 nm (TAOD550) foram obtidas a partir do CAMS (Inness et al., 2019). Nesse caso, o processamento dessas variáveis foi realizado de forma análoga ao procedimento anteriormente descrito, com uma pequena diferença na etapa de aquisição dos dados: após a seleção das variáveis de interesse e a aplicação dos filtros necessários no centro de dados do CAMS, os arquivos foram disponibilizados para download após um período de processamento.

Por fim, foi calculada a média mensal multianual para cada município, considerando um ponto específico da grade localizado próximo ou dentro da área urbana. Os nomes dos municípios e as coordenadas utilizadas para cada localidade foram: Boca do Acre (8,78°S, 67,33°W), Lábrea (7,26°S, 64,79°W), Humaitá (7,55°S, 63,07°W), Manicoré (5,79°S, 61,29°W), Novo Aripuanã (5,12°S, 60,37°W) e Apuí (7,20°S, 59,88°W).

Tanto o OMI quanto o CAMS foram desenvolvidos com o objetivo de fornecer dados globais de alta qualidade relacionados à composição atmosférica e à radiação UV. No entanto, a validação desses dados em regiões tropicais ainda é limitada quando comparada às latitudes médias e altas, onde estudos anteriores já demonstraram a consistência desses produtos em relação às medições de superfície (Matthijssen et al., 2000; Buchard et al., 2008; Ialongo et al., 2008; Kazadzis et al., 2009; Silva, 2011; Bernhard et al., 2015; Parisi et al., 2021). A ausência de validações extensivas em áreas tropicais pode introduzir incertezas nas estimativas, especialmente devido a condições atmosféricas específicas, como elevada cobertura de nuvens e propriedades particulares dos aerossóis durante a estação de queimadas.

Entretanto, é importante enfatizar que a ausência de dados de superfície não invalida as conclusões deste estudo. Ao contrário, ao utilizar dados satelitais amplamente reconhecidos e robustos, esta pesquisa contribui para suprir lacunas de conhecimento acerca da variabilidade da radiação UV em regiões tropicais, oferecendo uma perspectiva essencial em áreas onde estudos baseados em medições de superfície são escassos. Vale ainda ressaltar que tanto o OMI quanto o CAMS disponibilizam dados da TOC; contudo, nesta etapa, optou-se por utilizar a base de dados

do CAMS. Apesar de serem provenientes de modelagem, esses dados apresentam um coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,94 em comparação com os dados observacionais do OMI, o que indica excelente concordância entre ambas as fontes.

3.1.4 *Análise estatística*

Para simplificar a redação, a partir desta seção será adotado o termo $UVSI_{\lambda_a}$ para se referir simultaneamente às irradiâncias UV nos comprimentos de onda de 305, 310, 324 e 380 nm. Adicionalmente, para especificar um determinado comprimento de onda, serão utilizadas as notações λ_1 , λ_2 , λ_3 , and λ_4 em substituição a 305 nm, 310 nm, 324 nm e 380 nm, respectivamente.

3.1.4.1 *Filtragem de variáveis com random forest*

Para identificar as variáveis mais relevantes na explicação das variações de $UVSI_{\lambda_a}$, utilizou-se o método *Random Forest*, uma técnica de aprendizado de máquina reconhecida por sua robustez na análise de dados complexos e não lineares. Essa abordagem foi escolhida devido à sua capacidade de modelar interações entre variáveis preditoras e dependentes, bem como por sua eficiência no tratamento de fatores de confusão e colinearidade (Breiman, 2001; Rigatti, 2017).

Antes da aplicação do modelo, os dados passaram por uma padronização das variáveis preditoras, com o objetivo de otimizar o desempenho do modelo. O conjunto de dados foi dividido em dois subconjuntos, sendo 70 % destinado ao treinamento e 30 % à etapa de teste.

O algoritmo “RandomForestRegressor” da biblioteca “Scikit-learn” foi utilizado para o treinamento do modelo. As variáveis preditoras incluíram parâmetros atmosféricos e ambientais, como COT, TOC, TCWV, OMAOD550, $PM_{2.5}$, PM_{10} e TAOD550, enquanto $UVSI_{\lambda_a}$ foi definido como a variável dependente. Para avaliar a importância de cada variável, utilizou-se o critério de redução do erro quadrático médio (MSE), adotado pelo algoritmo Random Forest Regressor. Esse procedimento permitiu identificar as variáveis que mais contribuíram para a explicação da variabilidade observada na variável resposta.

A robustez do modelo foi assegurada por meio de validação cruzada, utilizando métricas como o coeficiente de determinação (R^2), o erro quadrático médio (MSE) e o erro absoluto médio (MAE).

3.1.4.2 Otimização do Modelo Random Forest

O desempenho do modelo *Random Forest* foi otimizado por meio das técnicas *Grid Search* (GridSearchCV) e *Randomized Search* (RandomizedSearchCV), com a avaliação de combinações relevantes de parâmetros (Pedregosa et al., 2011). Para o GridSearchCV, foram testados os seguintes valores:

- **n_estimators** (número de árvores no conjunto): [100, 200, 500, 1000];
- **max_features** (número máximo de variáveis consideradas em cada divisão): ['auto', 'sqrt', 'log2'];
- **max_depth** (profundidade máxima das árvores): [10, 20, 50, 100, None];
- **min_samples_split** (número mínimo de amostras necessário para dividir um nó interno): [2, 5, 10];
- **min_samples_leaf** (número mínimo de amostras necessário para formar um nó folha): [1, 2, 4];
- **bootstrap** (utilização de amostragem com reposição): [True, False].

Para o “RandomizedSearchCV”, os parâmetros foram explorados utilizando distribuições aleatórias e valores dentro das seguintes configurações (Biau & Scornet, 2016):

- **n_estimators**: distribuídos uniformemente entre 100 e 1000;
- **max_features**: ['auto', 'sqrt'];
- **max_depth**: [10, 50, None];
- **min_samples_split**: distribuídos uniformemente entre 2 e 20;
- **min_samples_leaf**: [1, 4, 8];
- **bootstrap**: [True, False].

Essas abordagens possibilitaram a identificação da combinação ideal de hiperparâmetros que maximizou o desempenho do modelo, garantindo um equilíbrio entre complexidade e capacidade preditiva (Probst et al., 2019).

As variáveis preditoras foram ranqueadas com base em sua importância, conforme extraída do modelo. Estabeleceu-se um critério objetivo: variáveis que explicaram menos de 50 % da variabilidade de $UVSI_{\lambda_a}$ foram excluídas das análises subsequentes. As variáveis selecionadas foram então submetidas a análises de tendências temporais e espaciais.

3.1.4.3 Análise de tendência e correlação

As tendências foram avaliadas por meio do teste não paramétrico de Mann-Kendall (MK) (Mann, 1945; Kendall, 1948). Um valor positivo indica tendência de aumento ao longo do tempo, enquanto um valor negativo sugere tendência de diminuição. O teste MK assume que os dados da

série temporal são independentes e distribuídos aleatoriamente, o que é verificado por meio da análise da Função de Autocorrelação (ACF).

Nos casos em que há autocorrelação significativa, aplica-se o teste Mann-Kendall Modificado (MMK), com base no método de Hamed-Rao, conforme implementado na biblioteca *pymannkendall*. Esse método ajusta a estatística do teste para considerar a dependência serial na série temporal, garantindo resultados robustos mesmo na presença de autocorrelação significativa.

Para quantificar as magnitudes das tendências identificadas, utilizou-se o método de Theil-Sen (Sen, 1968). Esse método é particularmente útil na análise de dados que podem conter valores discrepantes (*outliers*) e apresentar heterocedasticidade, sendo mais robusto e preciso do que as regressões lineares simples nesses cenários (Mengistu et al., 2020).

Essas abordagens estatísticas permitem, portanto, a identificação e a quantificação confiáveis de tendências no conjunto de dados, considerando as características específicas das séries temporais analisadas.

Para a análise das tendências e da significância estatística, foram calculadas as médias anuais para cada variável em cada ponto de grade. As tendências foram calculadas utilizando o teste Mann-Kendall Modificado (MMK), enquanto os valores de significância (valores de p) foram ajustados para múltiplos testes por meio do método de controle da Taxa de Falsas Descobertas (FDR) de Benjamini-Hochberg. Esse método foi escolhido por sua eficiência no controle de falsos positivos em análises que envolvem um grande número de testes. Antes do ajuste, valores de p ausentes foram preenchidos com 1,0 para garantir a consistência durante o processamento.

As tendências calculadas para todos os pixels da área de estudo foram apresentadas em mapas temáticos, nos quais os pixels com tendências estatisticamente significativas foram destacados com pontos pretos.

A correlação linear de Pearson foi utilizada para avaliar a relação entre as variáveis atmosféricas e os índices de radiação UV, com base na suposição de dependência linear entre variáveis contínuas. Embora o teste pressuponha a normalidade das distribuições, não foram aplicados testes formais de normalidade neste estudo, considerando que séries temporais ambientais frequentemente não atendem a esse critério. Ainda assim, o coeficiente de Pearson é amplamente adotado na literatura climatológica, mesmo sob leve violação desse pressuposto, especialmente quando se trabalha com amostras extensas (Zou et al., 2003). A espacialização dos

coeficientes foi realizada de forma análoga ao processo aplicado na análise de tendências, permitindo identificar padrões regionais de associação.

Para a elaboração dos mapas temáticos, os dados foram interpolados para uma resolução espacial de $0,25^\circ$ e os mapas foram confeccionados utilizando o Sistema de Coordenadas Geográficas (WGS 84), em conformidade com os padrões dos produtos OMI e CAMS. Os arquivos “*shapefile*” das divisas administrativas dos municípios foram padronizados para o mesmo sistema de coordenadas, garantindo a compatibilidade com os dados analisados e permitindo uma representação espacial precisa das tendências e correlações observadas.

3.2 Resultados

3.2.1 Sazonalidade da irradiância UV, ozônio e nuvens

Os resultados apresentados na Figura 3-2 indicam que as variações sazonais de $UVSI_{\lambda_a}$ entre janeiro e março (verão austral) foram mais intensas, com médias superiores a 82, 116, 370 e 640 mWm^{-2} , respectivamente. Observa-se que os maiores valores médios de $UVSI_{\lambda_a}$ ocorreram em fevereiro. Entre outubro e dezembro (primavera austral), os valores de $UVSI_{\lambda_a}$ foram menos intensos em comparação ao verão, com médias superiores a 72, 104, 340 e 620 mWm^{-2} . Os maiores valores médios nesse período foram registrados em novembro. De abril a junho (outono austral), a intensidade de $UVSI_{\lambda_a}$ apresentou redução ao longo da estação, sendo junho o mês com as menores médias: 55, 84, 291 e 540 mWm^{-2} . Entre julho e setembro (inverno austral), a dinâmica dos valores médios de irradiância $UVSI_{\lambda_a}$ foi, em geral, oscilatória. Especificamente, de junho para julho, observou-se um leve aumento desses valores em cada município. Em agosto, as médias foram ligeiramente inferiores às de julho. Por fim, em setembro, verificou-se novo aumento nos valores médios de irradiância $UVSI_{\lambda_a}$.

A irradiância $UVSI_{\lambda_1}$ apresentou a maior variação em fevereiro, com desvios oscilando entre $\pm 4,4$ e ± 5 mWm^{-2} , enquanto em setembro as flutuações foram menores, variando de $\pm 1,3$ a $\pm 2,6$ mWm^{-2} (Figura 3-2a). Para a irradiância $UVSI_{\lambda_2}$, as maiores variações também foram observadas em fevereiro, e as menores em setembro, com desvios variando entre $\pm 5,2$ e $\pm 6,1$ mWm^{-2} e entre $\pm 1,7$ e $\pm 3,8$ mWm^{-2} , respectivamente (Figura 3-2b). Em relação às dispersões em torno das médias da irradiância $UVSI_{\lambda_3}$, as mais pronunciadas ($\pm 14,8$ a ± 21 mWm^{-2}) ocorreram em

novembro, enquanto as menores ($\pm 6,9$ a $\pm 13,5 \text{ mWm}^{-2}$) foram observadas em setembro (Figura 3-2c). Os desvios nas médias da irradiância $UVSI_{\lambda_4}$ foram mais expressivos em novembro, com valores variando entre $\pm 27,7$ e $\pm 39,6 \text{ mWm}^{-2}$, e menos acentuados em setembro, com amplitude limitada entre ± 14 e $\pm 26,8 \text{ mWm}^{-2}$ (Figura 3-2d).

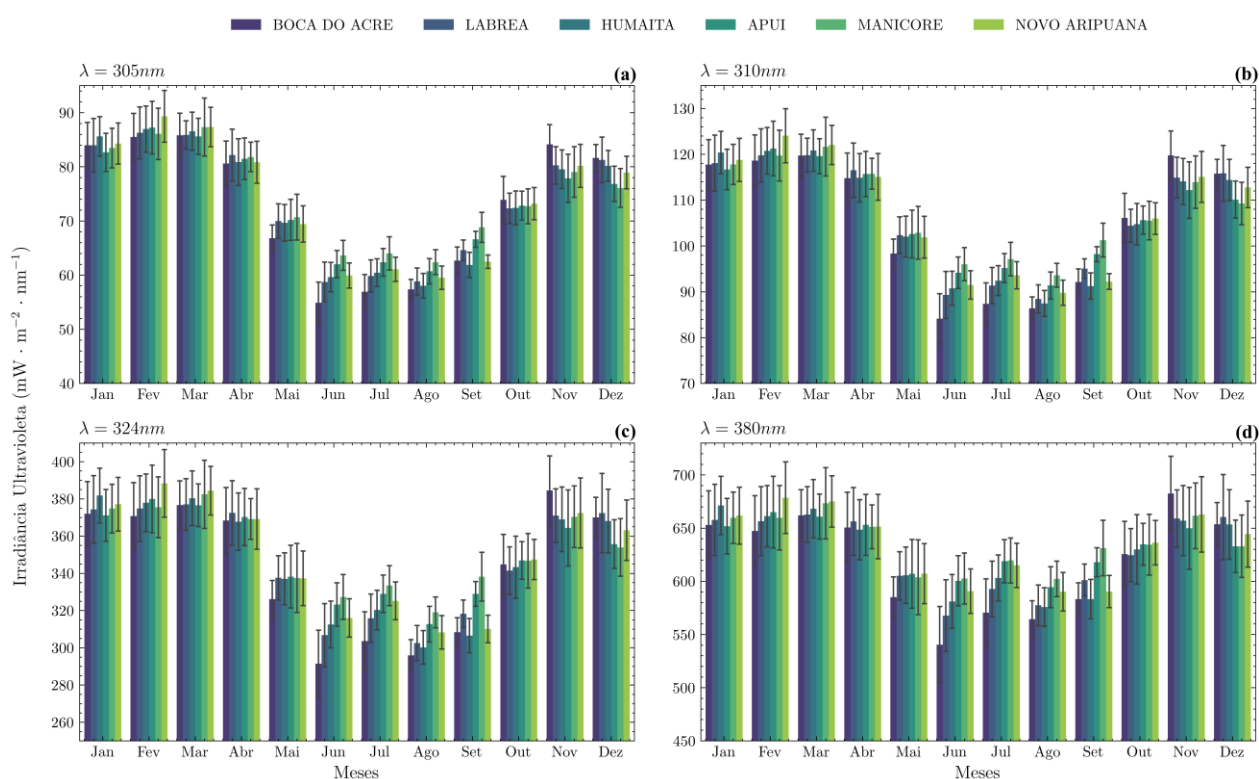


Figura 3-2 - Dinâmica da irradiância UV no sul do Amazonas entre 2005 e 2022. Os painéis (a), (b), (c) e (d) apresentam as médias mensais multianuais das irradiâncias UV para os comprimentos de onda de 305 nm, 310 nm, 324 nm e 380 nm, respectivamente, com barras de erro indicando a variabilidade mensal.

A dinâmica da TOC na mesorregião sul do Amazonas apresentou variações sazonais bem definidas, com variações espaciais mínimas, ou seja, inferiores a 0,5 DU entre os municípios. Durante o verão, não foram observadas alterações significativas; os níveis médios da TOC em janeiro e fevereiro atingiram cerca de 253 DU, enquanto em março ultrapassaram ligeiramente 255 DU. No outono, os níveis da TOC foram inferiores aos do verão. De fato, os valores mínimos (~ 248 DU) da estação e do ciclo anual foram registrados em maio. Ao longo do inverno, os níveis aumentaram de forma contínua, alcançando seu máximo no final da estação, com médias de aproximadamente 274 DU. Na primavera, a dinâmica dos níveis da TOC ocorreu em escala decrescente (Figura 3-3a).

A evolução temporal da COT, ao contrário da TOC, apresentou máximos no verão (fevereiro) e na primavera (dezembro). Do final do outono até o fim do inverno, observaram-se os menores valores de COT (Figura 3-3b).

Entretanto, a combinação entre TOC e COT revela como essas variáveis interagem ao longo do tempo (Figura 3-3c). Essa análise combinada permite uma visualização mais clara do comportamento dessas variáveis, identificando padrões sazonais que não são tão evidentes quando observadas isoladamente. Em julho, por exemplo, níveis moderadamente baixos da TOC, associados a baixos valores da COT, indicam uma situação crítica influenciada principalmente pela cobertura de nuvens, uma vez que a TOC varia apenas cerca de 10% nas latitudes analisadas. De fato, apesar de as irradiâncias UV serem menos intensas nesse mês, os efeitos da exposição excessiva à radiação UV podem ocasionar danos inesperados. Assim, esse cenário sugere a necessidade de medidas preventivas adicionais durante esse período.

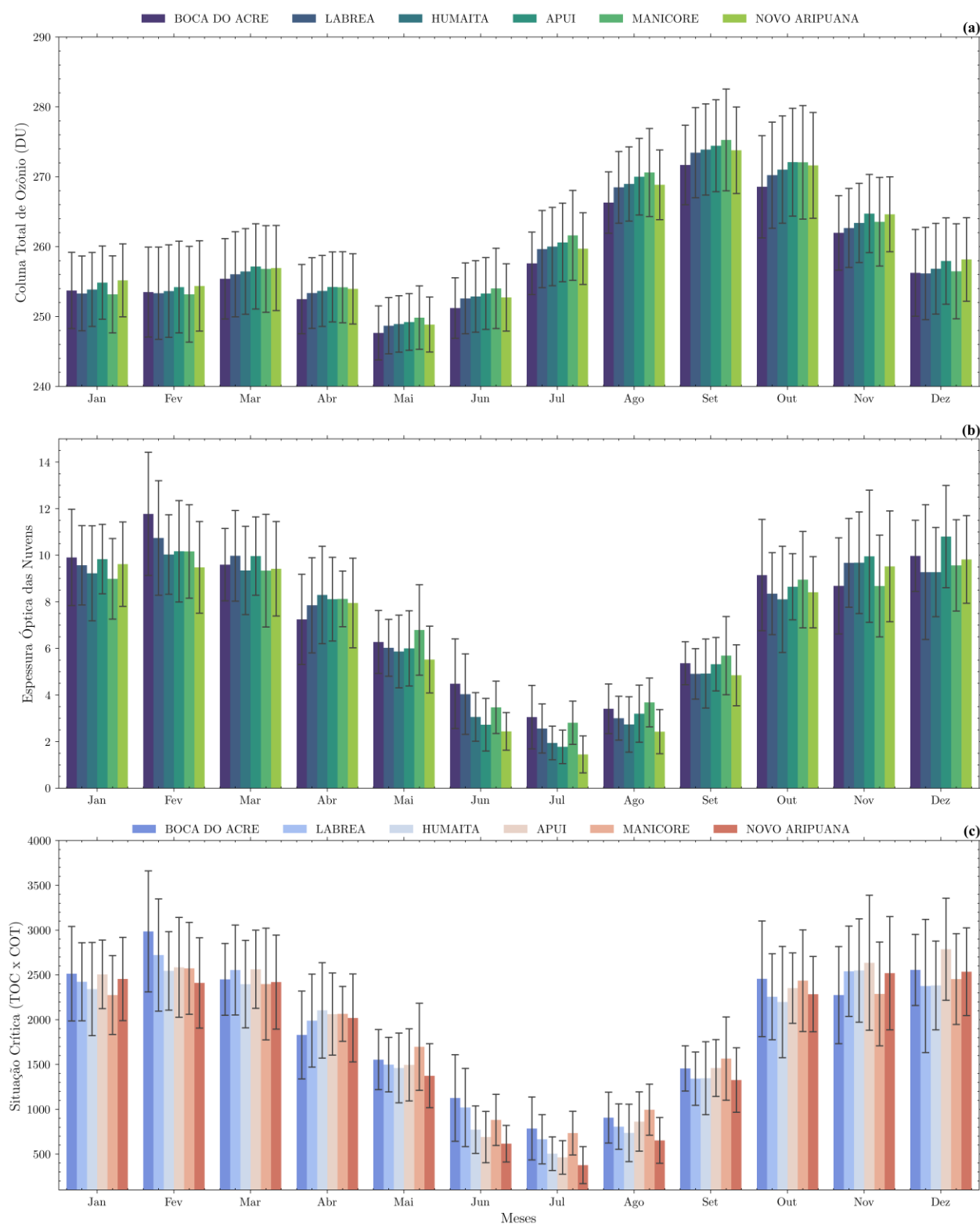


Figura 3-3 - Variações sazonais da Coluna Total de Ozônio (TOC), da Espessura Óptica das Nuvens (COT) e da situação crítica (TOC x COT) no sul do Amazonas entre 2005 e 2022. O painel (a) apresenta as médias mensais multianuais de TOC (em Unidades Dobson, DU), enquanto o painel (b) mostra as médias mensais multianuais de COT. O painel (c) exibe a situação crítica, calculada como o produto entre TOC e COT. As barras de erro indicam a variabilidade mensal.

3.2.2 Tendências na irradiância ultravioleta solar

As tendências temporais por pixel revelaram padrões de aumento e diminuição na $UVSI_{\lambda_a}$. Especificamente, todos os municípios apresentaram tendências predominantemente negativas na irradiância $UVSI_{\lambda_1}$ em grande parte de suas áreas, com exceção de Boca do Acre e de uma pequena porção no sudoeste de Lábrea, que exibiram tendências positivas. No entanto, entre essas tendências, apenas uma pequena área na porção norte de Apuí (zona urbana) e outra na direção centro-leste de Novo Aripuanã apresentaram significância estatística (Figura 3-4a). Para $UVSI_{\lambda_2}$, exceto por uma pequena área no nordeste de Novo Aripuanã, a tendência é predominantemente de aumento em todos os municípios, embora sem significância estatística (Figura 3-4b). Os resultados obtidos para $UVSI_{\lambda_3}$ e $UVSI_{\lambda_4}$ indicaram tendências positivas e estatisticamente significativas que cobrem, aproximadamente, toda a área de cada município (Figura 3-4c,d).

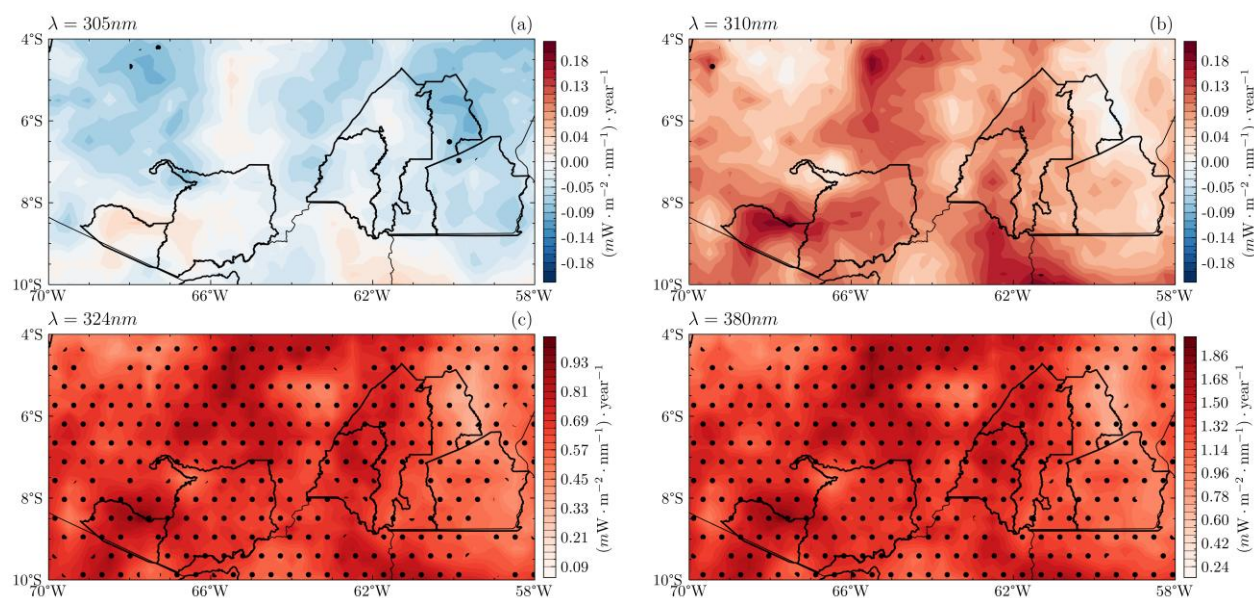


Figura 3-4 - Mapas espaciais das tendências de irradiância UV no sul do Amazonas entre 2005 e 2022, para diferentes comprimentos de onda: (a) 305 nm, (b) 310 nm, (c) 324 nm e (d) 380 nm. As cores representam a magnitude das tendências (em $mW \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1} \cdot ano^{-1}$), com áreas em azul indicando tendências negativas e áreas em vermelho indicando tendências positivas. Os pontos pretos destacam os pixels cujas tendências são estatisticamente significativas ($p < 0,05$).

3.2.3 Tendências no ozônio, aerossóis, vapor de água e nuvens

Esta seção apresenta as distribuições espaciais das tendências temporais para a TOC, a TAOD550, a TCWV e a COT, nas quais foram identificados potenciais padrões de mudança ao

longo do tempo. A compreensão dessas tendências é fundamental para discutir os mecanismos subjacentes à variabilidade de $UVSI_{\lambda_a}$ e para avaliar os possíveis impactos dessas mudanças sobre a biosfera.

De modo geral, observou-se um padrão de aumento na TOC em todos os municípios analisados, com taxas de crescimento variando entre 0,2 e 0,4 DU por ano. No entanto, do ponto de vista estatístico, esses aumentos não foram significativos, indicando que as variações observadas podem ser atribuídas a flutuações naturais (Figura 3-5a). Para TAOD550 e TCWV, foram identificadas tanto tendências positivas quanto negativas, mas nenhuma apresentou significância estatística (Figura 3-5b,c). As tendências da COT revelaram padrões interessantes. De modo geral, foi observada uma redução dessa variável em todos os municípios. Em particular, com exceção de pequenas áreas no sudoeste de Humaitá e no centro-sul de Manicoré, bem como áreas mais extensas em Novo Aripuanã (zona urbana) e Apuí, a maior parte da área de estudo apresentou tendências de redução estatisticamente significativas (Figura 3-5d).

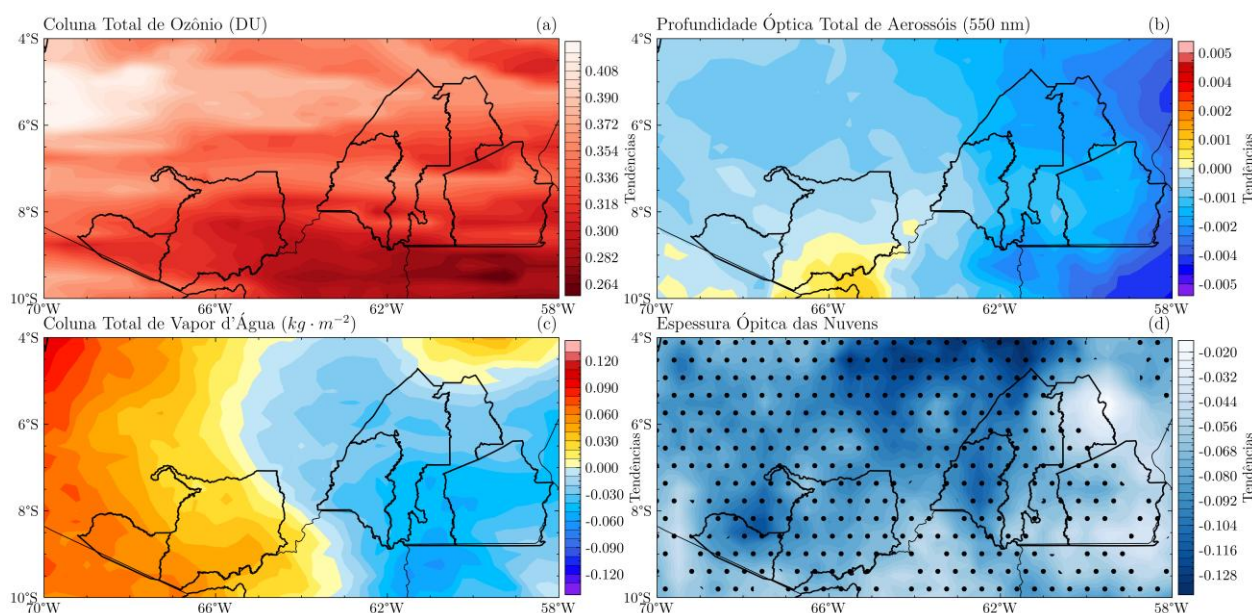


Figura 3-5 - Mapas espaciais das tendências anuais das variáveis atmosféricas no sul do Amazonas entre 2005 e 2022. Os painéis representam as tendências em: (a) Coluna Total de Ozônio (DU), (b) Profundidade Óptica Total de Aerossóis (550 nm), (c) Coluna Total de Vapor d'Água ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$) e (d) Espessura Óptica das Nuvens. As cores indicam a magnitude das tendências, com tons quentes representando tendências positivas e tons frios representando tendências negativas. No painel (d), os pontos pretos destacam os pixels cujas tendências são estatisticamente significativas ($p < 0,05$).

3.2.4 Correlações entre irradiância UV, ozônio e nuvens

A interação entre a radiação UV e os componentes atmosféricos têm despertado considerável interesse científico devido às suas implicações para a saúde humana, os ecossistemas e as mudanças climáticas. Esta seção apresenta as correlações de $UVSI_{\lambda_a}$ com TOC e COT. Essas variáveis desempenham papéis fundamentais na modulação da quantidade de radiação UV que atinge a superfície terrestre, influenciando diretamente a exposição da biosfera à radiação UV e suas consequências associadas.

A análise de correlação de Pearson entre $UVSI_{\lambda_a}$ e essas variáveis permitirá uma compreensão mais aprofundada das interações dinâmicas entre os constituintes atmosféricos e a radiação UV. A identificação de correlações significativas pode fornecer subsídios valiosos sobre os mecanismos de interação entre esses elementos e suas implicações para a variabilidade da radiação UV na região de estudo.

De modo geral, os resultados indicam uma correlação linear entre TOC e $UVSI_{\lambda_a}$. Especificamente, $UVSI_{\lambda_1}$ apresenta correlação negativa ($-0,83 \leq r \leq -0,15$) com a TOC, sendo estatisticamente significativa apenas quando $r < -0,45$. Espacialmente, com exceção de Boca do Acre e Humaitá, esses resultados predominam na maioria dos pixels em Lábrea, Manicoré, Novo Aripuanã e Apuí (Figura 3-6a). Para $UVSI_{\lambda_2}$, as correlações lineares variaram entre $-0,6$ e $0,6$, e para $UVSI_{\lambda_3}$ e $UVSI_{\lambda_4}$, variaram entre $-0,48$ e $0,48$; no entanto, nenhuma dessas correlações apresentou significância estatística (valor de $p > 0,05$) (Figura 3-6b,c,d).

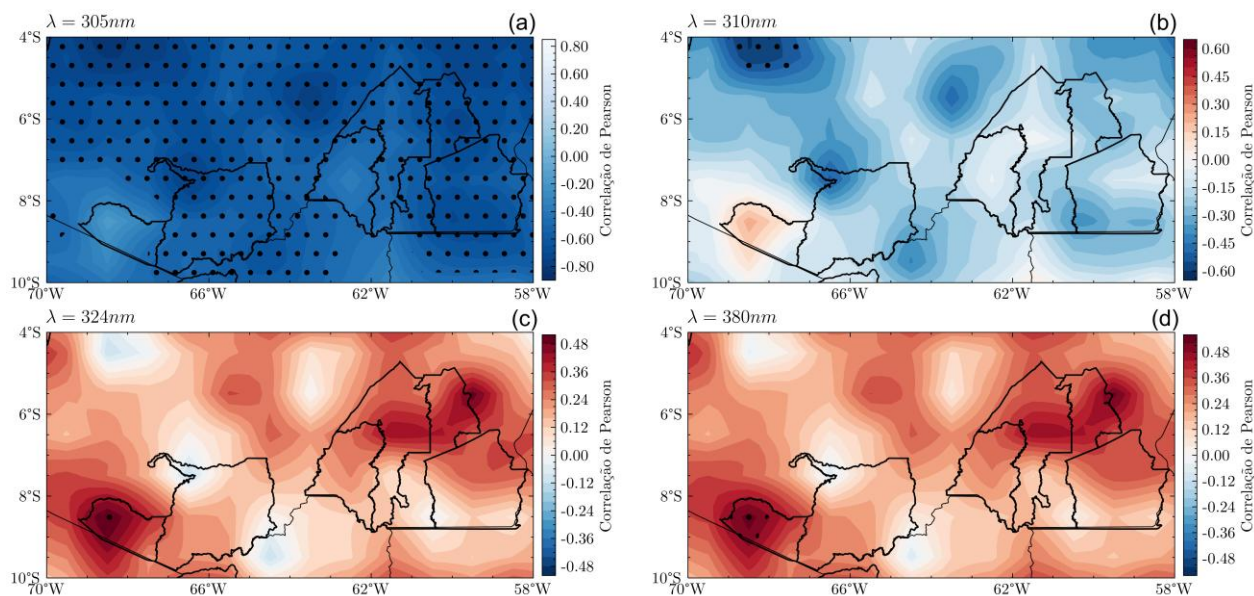


Figura 3-6 - Distribuição espacial da correlação linear de Pearson entre as irradiancias UV (em comprimentos de onda específicos) e a concentração de ozônio durante o período de 2005 a 2022. Os painéis (a), (b), (c) e (d) representam as correlações para os comprimentos de onda de 305 nm, 310 nm, 324 nm e 380 nm, respectivamente. A escala de cores indica a intensidade e a direção da correlação, com tonalidades azuis representando correlações negativas e tonalidades vermelhas representando correlações positivas. Os pontos pretos indicam os locais onde as correlações são estatisticamente significativas ($p < 0,05$).

A Figura 3-7b,c,d mostra que a COT apresenta correlação negativa com $UVSI_{\lambda_2}$, $UVSI_{\lambda_3}$ e $UVSI_{\lambda_4}$, com correlações estatisticamente significativas em praticamente toda a área de estudo, exceto na região nordeste de Novo Aripuanã, onde a correlação entre $UVSI_{\lambda_2}$ e COT é mais fraca (Figura 3-7b). Destaca-se que $UVSI_{\lambda_3}$ e $UVSI_{\lambda_4}$ exibem correlações mais fortes com a COT, variando de $-0,99 < r \leq -0,78$ em toda a área de estudo (Figura 3-7c,d).

Observou-se também que a irradiância UV_{λ_1} possui tanto correlações positivas quanto negativas com a COT. As correlações positivas estão confinadas a uma pequena área no norte de Novo Aripuanã, enquanto o restante da área de estudo apresenta correlações negativas, sendo Humaitá o único município com pixels distribuídos de forma mais ampla que mostram correlações significativas (p -valor $< 0,05$) em toda a sua área. Por outro lado, nos demais municípios, os pixels com essa característica estão concentrados nas regiões sul, com exceção de Boca do Acre, que possui menos de quatro pixels dispersos em sua extensão (Figura 3-7-a).

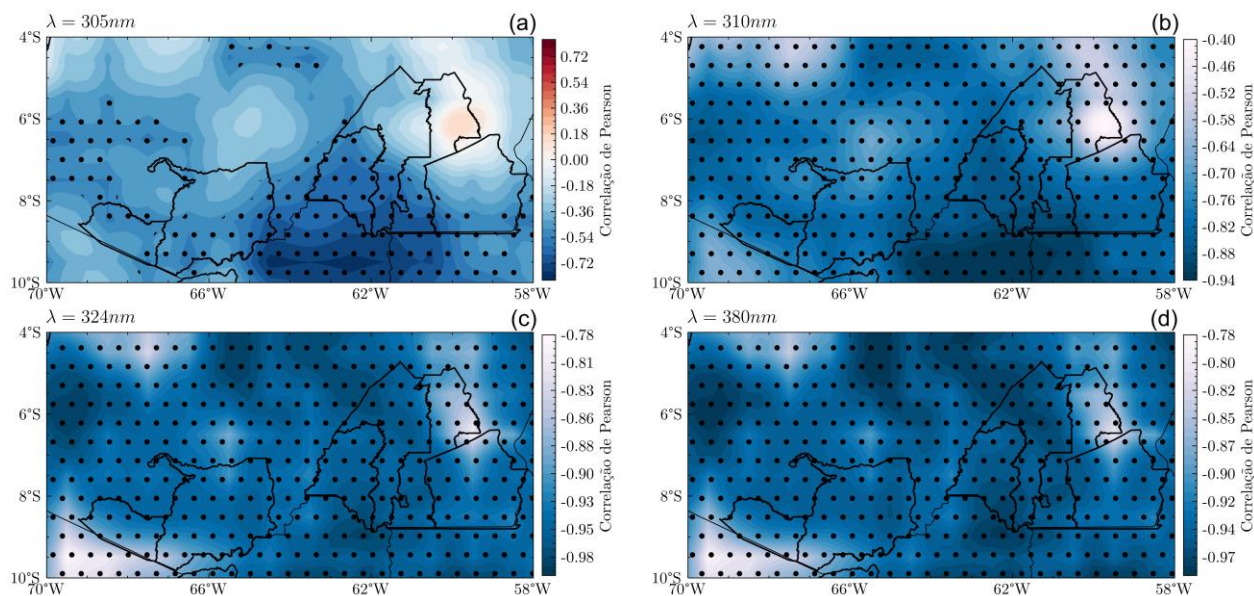


Figura 3-7 - Distribuição espacial da correlação linear de Pearson entre as irradiancias UV (em comprimentos de onda específicos) e a Espessura Óptica das Nuvens durante o período de 2005 a 2022. Os painéis (a), (b), (c) e (d) representam as correlações para os comprimentos de onda de 305 nm, 310 nm, 324 nm e 380 nm, respectivamente. A escala de cores indica a intensidade e a direção da correlação, com tonalidades azuis representando correlações negativas e tonalidades vermelhas representando correlações positivas. Os pontos pretos indicam os locais onde as correlações são estatisticamente significativas ($p < 0,05$).

As distribuições de COT, $UVSI_{\lambda_3}$ e $UVSI_{\lambda_4}$, em intervalos de seis anos para cada município, corroboram a correlação entre essas variáveis. Observou-se que, enquanto as medianas das distribuições de COT tendem a diminuir, as medianas das distribuições de $UVSI_{\lambda_3}$ e $UVSI_{\lambda_4}$ tendem a aumentar ao longo do tempo. Assim, a análise temporal das distribuições confirma a correlação inversa entre essas variáveis (Figura 3-8). Apesar da segmentação temporal a cada seis anos para identificar anormalidades ou mudanças que sugerissem a influência de eventos climáticos como El Niño e La Niña, não foram observadas anomalias relevantes entre os períodos.

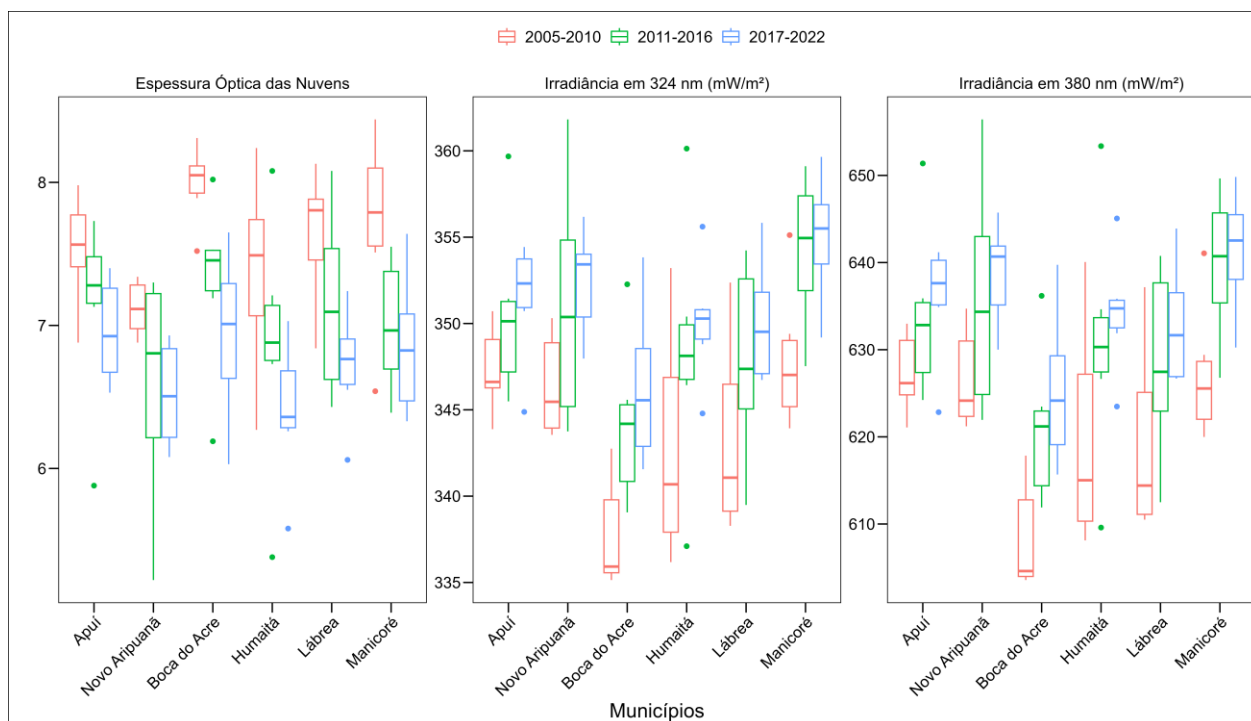


Figura 3-8 - Variabilidade das médias anuais da Espessura Óptica das Nuvens e das irradiâncias em 324 e 380 nm agrupadas por município a cada seis anos.

3.3 Discussão

3.3.1 Sazonalidade da irradiância UV

A complexa dinâmica da radiação UV é modulada por uma série de processos de interação, incluindo absorção e espalhamento por aerossóis, nuvens, oxigênio molecular, ozônio, vapor d'água, entre outros constituintes atmosféricos. Essas interações têm implicações diretas na intensidade da radiação UV à medida que ela atravessa a atmosfera e atinge a superfície terrestre (Zhang et al., 2019). Além disso, o ângulo de incidência da radiação UV em uma determinada latitude, durante uma estação específica e em uma certa altitude, também contribui para a complexidade dessa dinâmica (Reis et al., 2022).

O comportamento da $UVSI_{\lambda_a}$ ao longo do ano na mesorregião sul do Amazonas (Figura 3-2) pode ser explicado, inicialmente, pela influência de dois fatores geométricos inter-relacionados: a declinação solar e o Ângulo Zenital Solar (SZA, sigla do inglês *Solar Zenith Angle*) (Kerr, 2005). A declinação solar varia ao longo do ano devido à inclinação do eixo da Terra, afetando a posição aparente do Sol no céu e, consequentemente, o SZA (Liou, 2002). Como resultado, quando a declinação solar está mais ao sul e o SZA é menor ao meio-dia —

especificamente durante a primavera e o verão — a mesorregião sul do Amazonas recebe maior intensidade de radiação solar e, portanto, níveis mais elevados de $UVSI_{\lambda_a}$. Por outro lado, durante o outono e o inverno, quando a declinação solar se desloca mais ao norte e o SZA é maior ao meio-dia, uma menor quantidade de radiação solar e, consequentemente, níveis reduzidos de $UVSI_{\lambda_a}$ atingem a região. Dessa forma, a quantidade de radiação UV que alcança a superfície na região sul do Amazonas está fortemente relacionada a essas variações. Lopo et al. (2013) observaram um perfil sazonal semelhante para $UVSI_{\lambda_a}$ na cidade de Natal-RN, no nordeste do Brasil ($5^{\circ}48'S$, $35^{\circ}12'W$), seguindo um padrão semelhante ao registrado em outras áreas do Hemisfério Sul, conforme destacado por outros autores (Kirchhoff et al., 2000; Reis et al., 2023).

3.3.2 Sazonalidade do ozônio

As variações sazonais nos níveis de TOC (Figura 3-3a) desempenham um papel crucial na dinâmica da radiação UV, especialmente para $UVSI_{\lambda_1}$ e $UVSI_{\lambda_2}$ (Salas et al., 2017). A sazonalidade da TOC é resultado de um processo complexo, envolvendo a interação entre a circulação atmosférica, reações fotoquímicas, condições climáticas e transporte horizontal (Kerr, 2005; Kumar & Häder, 2012; Bernhard et al., 2023). Por exemplo, durante o inverno austral, a intensificação da circulação atmosférica (vórtice polar), condições fotoquímicas favoráveis e temperaturas mais baixas (com menor incidência de radiação) favorecem o aumento das concentrações de O_3 , com pico observado na primavera (Guarnieri et al., 2004; Lopo et al., 2014; Sousa et al., 2020; Bencherif et al., 2024). Assim, a estabilização dos níveis de radiação UV entre setembro e outubro, especialmente para $UVSI_{\lambda_1}$, ocorre porque a TOC no Hemisfério Sul atinge sua concentração máxima nesse período (Sousa et al., 2020), sobretudo devido à menor presença de nuvens nessa época do ano na mesorregião sul do Amazonas (Martins et al., 2023).

3.3.3 Sazonalidade das nuvens

A cobertura de nuvens exerce influência significativa sobre o sistema climático, atuando como um regulador fundamental do balanço de radiação da Terra (Boucher et al., 2013). Nesse contexto, a COT destaca-se como um parâmetro essencial para a caracterização das propriedades ópticas das nuvens, as quais dependem de suas características macro e microfísicas e são determinantes para a compreensão do efeito radiativo das nuvens (Hong & Liu, 2015; Aebi et al., 2020). O aumento da COT durante o verão (Figura 3-3b) pode estar associado à maior atividade

convectiva, resultando em maior formação de nuvens, especialmente cúmulos-nimbos associados a tempestades tropicais, comuns na região amazônica (Carvalho et al., 2011). Na primavera, a formação de nuvens também se intensifica em razão da transição entre as estações seca e chuvosa, o que gera um pico na COT (Figura 3-3b), embora em níveis inferiores aos observados no verão (Carvalho et al., 2011; Limberger & Silva, 2016; Martins et al., 2023).

A heterogeneidade espacial e temporal das nuvens dificulta a avaliação e a quantificação precisas das múltiplas interações entre a radiação e as nuvens, particularmente no que se refere à componente difusa da radiação UV. Na presença de grandes massas de ar, a radiação UV sofre espalhamento e absorção de forma mais eficiente, uma vez que há dependência espectral, conforme demonstrado por Seckmeyer et al. (1996) e Mayer et al. (1998).

Os estudos de Kylling et al. (1997), Mayer et al. (1998) e Lindfors & Arola (2008) argumentam que as nuvens são mais transparentes à radiação UV do que à radiação do espectro visível. Em geral, esses processos de interação levam à atenuação da radiação UV (Calbó et al., 2005), mas, sob determinadas condições, já se observou aumento em sua intensidade. Por exemplo, Miguel et al. (2011) constataram que as nuvens podem aumentar a radiação UV em até 22 %. Silva (2013) demonstrou, para uma área urbana de Belo Horizonte – MG (19°55'S, 43°56'W), que mesmo sob condições de céu nublado — especificamente com nuvens do tipo cúmulo — a incidência de radiação ultravioleta ao meio-dia atingiu níveis elevados.

3.3.4 *Interpretação das tendências e correlações*

Bernhard et al. (2023) identificaram que, embora pequenas (cerca de 4 % por década), as mudanças na radiação UV em latitudes baixas e médias (0–60°) têm aumentado em algumas localidades e diminuído em outras. Em ambos os casos, essas variações estão correlacionadas com alterações na cobertura de ozônio estratosférico, na cobertura de nuvens e no conteúdo de aerossóis atmosféricos.

Nos resultados apresentados neste estudo, as variações anuais na TOC desencadearam tendências de diminuição em $UVSI_{\lambda_1}$, embora não significativas. No entanto, essas tendências apresentam correlação significativa com o aumento nos níveis da TOC em grande parte da área de estudo. Assim, a atenuação da incidência de $UVSI_{\lambda_1}$ na atmosfera pela ação do ozônio na mesorregião sul do Amazonas é compatível com as observações realizadas em diversas localidades

(Weber et al., 2018; Aun et al., 2019; Bais et al., 2019; Bornman et al., 2019; Fountoulakis et al., 2019; Fountoulakis et al., 2021; Reis et al., 2022; Bernhard et al., 2023).

Por outro lado, as variações em $UVSI_{\lambda_2}$ apresentaram aumentos não significativos, os quais se correlacionam de forma consistente com as variações anuais da COT, que, por sua vez, exibiram tendências de redução estatisticamente significativas em quase toda a área de estudo. Essas tendências da COT refletiram-se fortemente no comportamento de $UVSI_{\lambda_3}$ e $UVSI_{\lambda_4}$. Bais et al. (2019), ao relacionarem as variações de radiação UV às mudanças climáticas, estimaram aumentos dessa radiação em baixas latitudes até o final do século XXI. Assim, a redução da COT desponta como um fator importante que contribui para o aumento da radiação UV na região sul do Amazonas.

A mesorregião sul do Amazonas é considerada uma área de transição entre ecossistemas de floresta densa e formações campestres naturais. Com o aumento das atividades agropecuárias e do crescimento populacional, essa região tornou-se uma das principais frentes de desmatamento no estado (Amaral, 2012; Fraxe et al., 2016; Duarte et al., 2019). Os municípios de Lábrea, Boca do Acre e Apuí, por exemplo, respondem por 19,6 % de todo o desmatamento registrado no Amazonas, motivo pelo qual foram incluídos na lista de prioridade do Ministério do Meio Ambiente para ações de combate ao desmatamento na Amazônia. No entanto, o avanço do desmatamento no sul do estado também atinge os municípios de Canutama, Humaitá, Manicoré e Novo Aripuanã (Stabile et al., 2020).

Nesse contexto, o desmatamento e as mudanças no uso da terra indicam possíveis alterações microclimáticas na região. De fato, a redução da cobertura arbórea e da vegetação resulta em menor evapotranspiração, reduzindo a umidade disponível para a formação de nuvens, conforme demonstrado por estudos realizados na região (Wang et al., 2009; Wang et al., 2016; Correia et al., 2021). Em áreas desmatadas, Wang et al. (2009) observaram que nuvens rasas são mais recorrentes, o que sugere menores valores de COT e, conseqüentemente, menor bloqueio da radiação UV, permitindo maior incidência de irradiância UVA na superfície.

O desmatamento intensifica a ocorrência de queimadas, que contribuem significativamente para o aumento da carga de aerossóis na troposfera, gerando efeitos radiativos relevantes. Esses aerossóis, ao interagirem com a radiação solar, podem atenuar a radiação ultravioleta incidente na superfície por meio de processos de absorção e dispersão. Em particular, partículas ricas em carbono provenientes de queimadas (como *black carbon*) são altamente

absorvedoras, reduzindo significativamente a irradiância UV na superfície. A magnitude desse efeito depende da composição, concentração e altitude da camada de aerossóis (Bais et al., 2014). Apesar da influência amplamente reconhecida de fatores ambientais, como os aerossóis provenientes da queima de biomassa, na modulação da radiação UV (Preez et al., 2021), os resultados deste estudo não indicaram relação significativa entre a profundidade óptica de aerossóis (AOD) e os níveis de irradiância UV na região analisada. Essa ausência de correlação pode refletir limitações nos dados utilizados, como a falta de medições *in situ* ou a ausência de ajustes específicos para aerossóis na camada limite atmosférica (Silva et al. 2022). Tal limitação ressalta a importância de investigações futuras que incorporem variáveis adicionais, como outros poluentes atmosféricos, a fim de aprofundar a compreensão sobre os fatores que influenciam a radiação UV na superfície, além da necessidade de investimentos na aquisição de sensores de UV para a realização de medições em superfície.

Na realidade, os resultados podem ter sido suavizados em função do uso de médias anuais, que não refletem a forte sazonalidade observada. Os maiores valores de AOD ocorrem durante a estação seca, entre julho e outubro, período marcado por um aumento significativo nas queimadas de origem antrópica (Freitas et al., 2005). Essas emissões elevam a concentração de material particulado inalável e gases-traço medidos ao nível da superfície, influenciando de forma indireta o balanço de radiação e o ciclo hidrológico. No balanço de radiação, os aerossóis atuam principalmente refletindo e absorvendo radiação solar, reduzindo a irradiância na superfície e modificando o perfil térmico da atmosfera. No ciclo hidrológico, alteram a microfísica das nuvens ao atuar como núcleos de condensação, o que pode inibir chuvas e prolongar períodos secos (Wang et al., 2009). Esse processo resulta em dois efeitos principais: primeiramente, o maior número de gotículas aumenta a reflexão da radiação solar de volta ao espaço, contribuindo para o resfriamento atmosférico; em segundo lugar, o menor tamanho das gotículas dificulta a coalescência necessária para a formação da precipitação, reduzindo a ocorrência de chuvas. Adicionalmente, a estabilização termodinâmica imposta pela interação direta dos aerossóis com a radiação solar — ao reduzir o aquecimento da atmosfera inferior em função da diminuição da radiação incidente — limita a formação de células convectivas próximas à superfície, inibindo a formação de nuvens (Wang et al., 2016).

Preez et al. (2021), ao investigarem o efeito dos aerossóis sobre a radiação UV de superfície durante a estação de queimadas na África, constataram que maiores valores de AOD corresponderam a uma redução de, no mínimo, 10 % nos níveis de radiação UV.

Esses fatores indicam que os efeitos das queimadas podem ultrapassar a escala local, influenciando o ciclo hidrológico regional e potencialmente alterando o padrão de redistribuição de energia no planeta, em especial no transporte de energia dos trópicos para as latitudes médias e altas (Freitas et al., 2005).

Embora a fração de radiação UV seja pequena quando comparada à radiação solar total que atinge a superfície (~5–6 %), ela desempenha um papel crucial em processos específicos, como reações fotoquímicas que afetam a composição atmosférica, incluindo a formação de ozônio e a modificação das propriedades ópticas dos aerossóis. Esses processos, mesmo que de forma indireta, podem influenciar o balanço de energia ao alterar as propriedades radiativas da atmosfera e da superfície (IARC, 212b).

Portanto, estudos voltados à compreensão dessas interações são essenciais para elucidar o impacto dos aerossóis e poluentes sobre a radiação UV e, conseqüentemente, sobre o clima em escalas local e regional.

3.3.5 Potenciais impactos do UVA

Durante décadas, acreditava-se que apenas os comprimentos de onda entre 280 e 315 nm, ou seja, o espectro UVB, eram responsáveis pelos danos à pele e ao DNA. No entanto, evidências crescentes sobre os efeitos desencadeados pela radiação UVA (315 a 400 nm) destacam a complexidade dos riscos associados à radiação UV (ICNIRP, 2004). Estudos recentes demonstram que a radiação UVA pode induzir imunossupressão, mutagênese e carcinogênese humana, especialmente melanoma (Ullrich, 2005; Ghissassi et al., 2009; Halliday et al., 2011; Sola & Lorente, 2015; Fountoulakis et al., 2020), além de contribuir para o envelhecimento precoce da pele por meio de efeitos oxidativos (Girard et al., 2011; Sage et al., 2012).

O presente estudo, ao indicar padrões sazonais e tendências nas irradiâncias UV na mesorregião sul do Amazonas, revela um aumento significativo nas irradiâncias UVA (324 e 380 nm) e uma redução na Espessura Óptica das Nuvens, sinalizando um possível aumento na exposição a riscos associados à radiação UVA. Damian et al. (2011) demonstraram que o espectro

de ação da radiação UV para induzir imunossupressão em humanos apresenta dois picos, um centrado na faixa UVB (em 300 nm) e outro na faixa UVA (em 370 nm).

Dessa forma, considerando os efeitos nocivos da radiação UVA e a ausência de monitoramento adequado, torna-se essencial a implementação de medidas protetivas eficazes para mitigar os riscos à saúde. A integração desses dados com estratégias de saúde pública pode proporcionar uma abordagem mais efetiva para a proteção da população, especialmente em regiões vulneráveis como o sul do Amazonas, onde as mudanças ambientais e o desmatamento podem agravar os riscos associados à exposição à radiação UV.

3.4 Considerações Finais

Este estudo apresentou uma análise detalhada das variações sazonais e das tendências nas irradiâncias UV (305, 310, 324 e 380 nm) na mesorregião sul do Amazonas, revelando padrões sazonais bem definidos, com intensidades máximas no verão e na primavera. As maiores e menores variações mensais nas irradiâncias UV (305 e 310 nm) ocorreram em fevereiro e setembro, respectivamente, enquanto para as irradiâncias UV (324 e 380 nm), essas variações foram observadas em novembro e setembro. Esses padrões refletem a forte dependência da irradiância UV em relação ao ângulo zenital solar.

Foram identificadas tendências estatisticamente significativas de aumento nas irradiâncias UV (324 e 380 nm) ao longo do período de estudo, acompanhadas por uma redução na Espessura Óptica das Nuvens, o que pode explicar as tendências observadas para a radiação UVA. A correlação negativa entre o ozônio e a irradiância UV a 305 nm, bem como a forte correlação entre a Espessura Óptica das Nuvens e as irradiâncias UV a 324 e 380 nm, evidenciam a complexa interação entre esses parâmetros atmosféricos.

A análise combinada dos dados de ozônio e Espessura Óptica das Nuvens revelou uma situação crítica em julho, sugerindo a necessidade de precauções adicionais quanto à exposição à radiação UV nesse período. Além disso, a forte correlação entre as distribuições das irradiâncias UV (324 e 380 nm) e da Espessura Óptica das Nuvens ao longo de intervalos de seis anos reforça a importância do monitoramento contínuo dessas variáveis.

Embora não tenha sido identificada uma relação significativa entre aerossóis e irradiância UV, este estudo contribui ao destacar a necessidade de investigações futuras que incorporem

medições diretas de radiação UV e análises mais detalhadas de outros fatores ambientais, como gases-traço e interações nuvem-aerossol.

Preocupações significativas emergem com o aumento anual das irradiâncias UVA na região sul da Amazonas, especialmente diante da ausência de monitoramento adequado e preciso da radiação UV em superfície. Essa situação ressalta a necessidade urgente de investimentos em tecnologias de monitoramento mais avançadas, que possibilitem uma avaliação mais precisa e detalhada da irradiância UV.

Diante dos cenários de mudanças no uso da terra e do avanço do desmatamento na região amazônica, os resultados deste estudo ressaltam a necessidade de aprofundar as investigações sobre a variabilidade e os impactos da radiação UV, tanto em contextos locais quanto globais. Assim, é inegável que investimentos substanciais em sensores avançados são imprescindíveis para aprimorar as medições de irradiância UV na região amazônica, uma vez que esse monitoramento se torna essencial para a formulação e o desenvolvimento de estratégias de proteção e prevenção em áreas como saúde pública, agricultura e conservação ambiental.

Por fim, este estudo destaca a importância de se enfrentar as lacunas de dados em regiões tropicais, especialmente no que se refere às interações entre aerossóis, ozônio troposférico e radiação UV. Embora os dados de satélite ofereçam cobertura global essencial, sua validação em áreas tropicais ainda é limitada, o que enfatiza a necessidade de medições complementares *in situ*. Este trabalho fornece uma base inicial para a compreensão dessas interações em condições tropicais, mas estudos futuros devem integrar abordagens de validação e refinamentos nos algoritmos a fim de representar com maior precisão a variabilidade local.

3.5 Referências do Capítulo

- Aebi, C. et al., 2020. Estimation of cloud optical thickness, single scattering albedo and effective droplet radius using a shortwave radiative closure study in Payerne. *Atmospheric Measurement Techniques*, **13**, 907–923. <https://doi.org/10.5194/amt-13-907-2020>
- Amaral, P., 2012. *Áreas protegidas no Sul do Estado do Amazonas*. Imazon.
- Aun, M., et al., 2019. Daily, seasonal, and annual characteristics of UV radiation and its influencing factors in Tõravere, Estonia, 2004–2016. *Theoretical and Applied Climatology*, **138**, 887–897. <https://doi.org/10.1007/s00704-019-02865-1>

- Bais, A. F., et al., 2014. Ozone depletion and climate change: Impacts on UV radiation. *Photochemical & Photobiological Sciences*, **14**, 19-52. <https://doi.org/10.1039/c4pp90032d>
- Bais, A. F. et al., 2019. Ozone–climate interactions and effects on solar ultraviolet radiation. *Photochemical & Photobiological Sciences*, **18**, 602–640. <https://doi.org/10.1039/C8PP90059K>
- Bencherif, H. et al., 2024. Ozone Trend Analysis in Natal (5.4°S, 35.4°W, Brazil) Using Multi-Linear Regression and Empirical Decomposition Methods over 22 Years of Observations. *Remote Sensing*, **16**, 208. <https://doi.org/10.3390/rs16010208>
- Bernhard, G. et al., 2015. Comparison of OMI UV observations with ground-based measurements at high northern latitudes. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **15**, 7391-7412. <https://doi.org/10.5194/acp-15-7391-2015>
- Bernhard, G. H. et al., 2023. Stratospheric ozone, UV radiation, and climate interactions. *Photochemical & Photobiological Sciences*, **22**, 937–989. <https://doi.org/10.1007/s43630-023-00371-y>
- Biau, G., & Scornet, E., 2016. A random forest guided tour. *TEST*, **25**, 197–227. <https://doi.org/10.1007/s11749-016-0481-7>
- Bornman, J. F. et al., 2019. Linkages between stratospheric ozone, UV radiation and climate change and their implications for terrestrial ecosystems. *Photochemical & Photobiological Sciences*, **18**, 681–716. <https://doi.org/10.1039/C8PP90061B>
- Boucher, O., et al. (2013). Clouds and Aerosols. In T. F. Stocker, et al. (Eds.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 571-657). Cambridge: Cambridge University Press. <https://hdl.handle.net/11858/00-001M-0000-0018-F5F9-F>
- Breiman, L., 2001. Random Forests. *Machine Learning*, **45**, 5–32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- Buchard, V. et al., 2008. Comparison of OMI ozone and UV irradiance data with ground-based measurements at two French sites. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **8**, 4517-4528. <https://doi.org/10.5194/acp-8-4517-2008>
- Calbó, J., et al., 2005. Empirical studies of cloud effects on UV radiation: A review. *Reviews of Geophysics*, **43**, RG2002. <https://doi.org/10.1029/2004RG000155>
- Carvalho, L. M. V. et al., 2011. Moisture transport and intraseasonal variability in the South America monsoon system. *Climate dynamics*, **36**, 1865–1880. <https://doi.org/10.1007/s00382-010-0806-2>
- Ceccato, P. et al., 2021. Copernicus Global Land Products: Reviewing Process for High Quality Services. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS*, 6638–6641. <https://doi.org/10.1109/IGARSS47720.2021.9554936>
- Correia, A. L., et al., 2021. Preconditioning, aerosols, and radiation control the temperature of glaciation in Amazonian clouds. *Communications earth & environment*, **2**, 168. <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00250-3>

- Damian, D. L., et al., 2011. An action spectrum for ultraviolet radiation-induced immunosuppression in humans. *British Journal of Dermatology*, **164**, 657–659. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2133.2010.10161.x>
- Duarte, M., et al., 2019. Pressões ambientais em Unidades de Conservação: estudo de caso no sul do Estado do Amazonas. *GOT: Revista de Geografia e Ordenamento do Território*, **18**, 108-125.
- Eck, T. F., et al., 1995. Satellite estimation of spectral UVB irradiance using TOMS derived total ozone and UV reflectivity. *Geophysical Research Letters*, **22**, 611–614. <https://doi.org/10.1029/95GL00111>
- Fountoulakis, I. et al., 2019. Solar UV irradiance in a changing climate: Trends in Europe and the significance of spectral monitoring in Italy. *Environments*, **7**, 2-31. <https://doi.org/10.3390/environments7010001>
- Fountoulakis, I. et al., 2021. Variability and trends in surface solar spectral ultraviolet irradiance in Italy: on the influence of geopotential height and lower-stratospheric ozone. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **21**, 18689–18705. <https://doi.org/10.5194/acp-21-18689-2021>
- Fountoulakis, I. et al., 2020. Monitoring of solar spectral ultraviolet irradiance in Aosta, Italy. *Earth System Science Data*, **12**, 2787-2810. <https://doi.org/10.5194/essd-12-2787-2020>
- Franca, R. R. d. & Mendonça, F. d. A., 2016. A pluviosidade na Amazônia meridional: variabilidade e teleconexões extra-regionais. *Confins. Revue franco-brésilienne de géographie/Revista franco-brasileira de geografia*, **29**. <https://doi.org/10.4000/confins.11580>
- Fraxe, T. J. P., et al., 2016. Áreas protegidas no Amazonas: conservação e sustentabilidade como preceitos ambientais indissociáveis. *Revista Amazônica de Ensino de Ciências*, **10**, 63-71.
- Freitas, S. R., et al., 2005. Emissões de queimadas em ecossistemas da América do Sul. *Estudos Avançados*, **19**, 167-185. <https://doi.org/10.1590/S0103-40142005000100011>
- Ghissassi, F. E., et al., 2009. A review of human carcinogens – Part D: radiation. *The Lancet Oncology*, **10**, 751–752. [https://doi.org/10.1016/S1470-2045\(09\)70213-X](https://doi.org/10.1016/S1470-2045(09)70213-X)
- Girard, P. M. et al., 2011. UVA-induced damage to DNA and proteins: direct versus indirect photochemical processes. *Journal of Physics: Conference Series*, **261**, 0122002. <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/261/1/012202>
- Guarnieri, R. A. et al., 2004. Ozone and UV-B radiation anticorrelations at fixed solar zenith angles in southern Brazil. *Geofísica Internacional*, **43**, 17–22.
- Halliday, G. M., et al., 2011. Ultraviolet A radiation: its role in immunosuppression and carcinogenesis. *Semin. Cutan. Med. Surg.*, **30**, 214–221. <https://doi.org/10.1016/j.sder.2011.08.002>
- Herman, J. R. et al., 1999. Distribution of UV radiation at the Earth's surface from TOMS-measured UV-backscattered radiances. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **104**, 12059–12076. <https://doi.org/10.1029/1999JD900062>
- Herman, J. R., et al., 2001. Changes in the Earth's UV reflectivity from the surface, clouds, and aerosols. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **106**, 5353–5368. <https://doi.org/10.1029/2000JD900435>

- Hong, Y. & Liu, G., 2015. The characteristics of ice cloud properties derived from CloudSat and CALIPSO measurements. *Journal of Climate*, **28**, 3880–3901. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00666.1>
- Hovila, J., et al., 2013. *OMI/Aura Surface UVB Irradiance and Erythral Dose Daily L3 Global Gridded 1.0 degree x 1.0 degree V3*. s.l.:s.n. <https://doi.org/10.5067/Aura/OMI/DATA3009>
- Ialongo, I., et al., 2008. Comparison of total ozone and erythral UV data from OMI with ground-based measurements at Rome station. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **8**, 3283–3289. <https://doi.org/10.5194/acp-8-3283-2008>
- IBGE, 2022. *Cidades e estados do Brasil*. <https://cidades.ibge.gov.br/>. (Acessado em fevereiro de 2023).
- ICNIRP, 2004. Guidelines on limits of exposure to ultraviolet radiation of wavelengths between 180 nm and 400 nm (incoherent optical radiation). *Health Physics*, **87**, 171–186. <https://doi.org/10.1097/00004032-200408000-00006>
- Inness, A. et al., 2019. The CAMS reanalysis of atmospheric composition. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **19**, 3515–3556. <https://doi.org/10.5194/acp-19-3515-2019>
- Kazadzis, S. et al., 2009. Ozone Monitoring Instrument spectral UV irradiance products: comparison with ground based measurements at an urban environment. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **9**, 585–594. <https://doi.org/10.5194/acp-9-585-2009>
- Kendall, M. G., 1948. *Rank correlation methods*. In: Public Program Analysis. Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-1-4684-6683-6_9
- Kerr, J. B., 2005. Understanding the factors that affect surface ultraviolet radiation. *Optical Engineering*, **44**, 041002. <https://doi.org/10.1117/1.1886817>
- Kirchhoff, V. W. J. H., et al., 2000. A variação sazonal da radiação ultravioleta solar biologicamente ativa. *Revista Brasileira de Geofísica*, **18**, p. 63–74. <https://doi.org/10.1590/S0102-261X2000000100006>
- Krotkov, N. A. et al., 1998. Satellite estimation of spectral surface UV irradiance in the presence of tropospheric aerosols: 1. Cloud-free case. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **103**, 8779–8793. <https://doi.org/10.1029/98JD00233>
- Kumar, H. D. & Häder, D.-P., 2012. *Global aquatic and atmospheric environment*. Springer Science & Business Media.
- Kylling, A., et al., 1997. Transmittance of a cloud is wavelength-dependent in the UV-range: Physical interpretation. *Geophysical Research Letters*, **24**, 397–400. <https://doi.org/10.1029/97GL00111>
- Levelt, P. F. et al., 2006. The ozone monitoring instrument. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **44**, 1093–1101. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.872333>
- Limberger, L. & Silva, M. E. S., 2016. Precipitação na bacia amazônica e sua associação à variabilidade da temperatura da superfície dos oceanos Pacífico e Atlântico: uma revisão. *GEOUSP Espaço e Tempo*, **20**, 657–675. <https://doi.org/10.11606/issn.2179-0892.geousp.2016.105393>

- Lindfors, A. & Arola, A., 2008. On the wavelength-dependent attenuation of UV radiation by clouds. *Geophysical research letters*, Volume **35**. <https://doi.org/10.1029/2007GL032571>
- Liou, K.-N., 2002. *An introduction to atmospheric radiation*. Elsevier.
- Lopo, A. B., et al., 2014. UV extreme events in Northeast of Brazil. *Ciência e Natura*, **36**, p. 482–490. <https://dx.doi.org/10.5902/2179460X12816>
- Lopo, A. B., et al., 2013. Ozone and aerosol influence on ultraviolet radiation on the east coast of the Brazilian Northeast. *Atmospheric and Climate Sciences*, **4**, 92-99. <http://dx.doi.org/10.4236/acs.2014.41012>
- Mann, H. B., 1945. Nonparametric tests against trend. *Econometrica: Journal of the econometric society*, **13**, 245–259. <https://doi.org/10.2307/1907187>
- Martins, P. A. S. et al., 2023. Updating of the Köppen and Thornthwaite and Mather (1955) climate classification system for the Southern Amazonas. *Revista do Departamento de Geografia*, **43**, e191137. <https://doi.org/10.11606/eISSN.2236-2878.rdg.2023.191137>
- Matthijsen, J., et al., 2000. Reduction of solar UV by clouds: A comparison between satellite-derived cloud effects and ground-based radiation measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **105**, 5069-5080. <https://doi.org/10.1029/1999JD900937>
- Mayer, B., et al., 1998. Enhanced absorption of UV radiation due to multiple scattering in clouds: Experimental evidence and theoretical explanation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **103**, 31241–31254. <https://doi.org/10.1029/98JD02676>
- Mengistu, A. G., et al., 2020. Analysis of the spatio-temporal variability of precipitation and drought intensity in an arid catchment in South Africa. *Climate*, **8**, 70. <https://doi.org/10.3390/cli8060070>
- Miguel, A., et al., 2011. Evolution of erythemal and total shortwave solar radiation in Valladolid, Spain: Effects of atmospheric factors. *Journal of atmospheric and solar-terrestrial physics*, Volume **73**, 578–586. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2010.11.021>
- Parisi, A. V. et al., 2021. Satellite monitoring of environmental solar ultraviolet A (UVA) exposure and irradiance: a review of OMI and GOME-2. *Remote Sensing*, **13**, 752. <https://doi.org/10.3390/rs13040752>
- Peuch, V.-H. et al., 2022. The copernicus atmosphere monitoring service: From research to operations. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Volume **103**, E2650–E2668. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-21-0314.1>
- Preez, D. J. et al., 2021. Solar Ultraviolet Radiation in Pretoria and Its Relations to Aerosols and Tropospheric Ozone during the Biomass Burning Season. *Atmosphere*, **12**, 132. <https://doi.org/10.3390/atmos12020132>
- Reis, G. C. G. et al., 2023. UV index seasonal variability in an Amazonian city of Brazil based on satellite data. *ciencia e natura*, **45**, e76670. <https://doi.org/10.5902/2179460X76670>
- Reis, G. et al., 2022. Solar Ultraviolet Radiation Temporal Variability Analysis from 2-Year of Continuous Observation in an Amazonian City of Brazil. *Atmosphere*, **13**, p. 1054. <https://doi.org/10.3390/atmos13071054>

- Sage, E., et al., 2012. Unravelling UVA-induced mutagenesis. *Photochemical & Photobiological Sciences*, **11**, 74–80. <https://doi.org/10.1039/C1PP05219E>
- Salas, L. F. S, et al., 2017. Ultraviolet solar radiation in the tropical central Andes (12.0 S). *Photochemical & Photobiological Sciences*, **16**, 954–971. <https://doi.org/10.1039/c6pp00161k>
- Seckmeyer, G., et al., 1996. Transmittance of a cloud is wavelength-dependent in the UV-range. *Geophysical Research Letters*, **23**, 2753–2755. <https://doi.org/10.1029/96GL02614>
- Sen, P. K., 1968. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American statistical association*, **63**, 1379–1389. <https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>
- Silva, A. A., 2011. Local cloud cover, ground-based and satellite measurements of erythema dose rate for an urban, tropical site in Southern Hemisphere. *Journal of atmospheric and solar-terrestrial physics*, **73**, 2474–2481. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2011.09.002>
- Silva, A. A., 2013. Erythema dose rate under noon overcast skies. *Photochemical & Photobiological Sciences*, **12**, 777–786. <https://doi.org/10.1039/c2pp25330e>
- Silva, A. A., et al., 2022. Ground-based and Satellite Measurements of Solar Spectral Irradiances at 305 nm and 380 nm at a Tropical Site. *Photochemistry and Photobiology*, **98**, 1245–1251. <https://doi.org/10.1111/php.13608>
- Silva, A. A. & Tomaz, L. M., 2012. Total ozone column measurements for an urban, tropical site in the Southern Hemisphere with a Microtops II. *Journal of atmospheric and solar-terrestrial physics*, **77**, 161–166. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2011.12.014>
- Sola, Y. & Lorente, J., 2015. Contribution of UVA irradiance to the erythema and photoaging effects in solar and sunbed exposures. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, Volume **143**, 5–11. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2014.10.024>
- Sousa, C. T. et al., 2020. Ozone trends on equatorial and tropical regions of South America using Dobson spectrophotometer, TOMS and OMI satellites instruments. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, **203**, 105272. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105272>
- Stabile, M. C. C. et al., 2020. Solving Brazil's land use puzzle: Increasing production and slowing Amazon deforestation. *Land use policy*, **91**, 104362. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.104362>
- Stammes, P. & Noordhoek, R., 2002. *OMI Algorithm Theoretical Basis Document: Clouds, Aerosols and Irradiance* (ATBD-OMI-03, Version 2.0). Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI). <https://eospsso.gsfc.nasa.gov/sites/default/files/atbd/ATBD-OMI-03.pdf>
- Tanskanen, A. (2004). *Lambertian surface albedo climatology at 360 nm from TOMS data using moving time-window technique* (FMI Report 2004:01). Finnish Meteorological Institute.
- Tanskanen, A., Krotkov, N. A., Herman, J. R. & Arola, A., 2006. Surface ultraviolet irradiance from OMI. *IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **44**, 1267–1271. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2005.862203>

- Ullrich, S. E., 2005. Mechanisms underlying UV-induced immune suppression. *Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis*, **571**, 185-205. <https://doi.org/10.1016/j.mrfmmm.2004.06.059>
- Wang, J. et al., 2009. Impact of deforestation in the Amazon basin on cloud climatology. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **106**, 3670-3674. <https://doi.org/10.1073/pnas.0810156106>
- Wang, J. et al., 2016. Amazon boundary layer aerosol concentration sustained by vertical transport during rainfall. *Nature*, **539**, 416–419. <https://doi.org/10.1038/nature19819>
- Weber, M. et al., 2018. Total ozone trends from 1979 to 2016 derived from five merged observational datasets—the emergence into ozone recovery. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **18**, 2097–2117. <https://doi.org/10.5194/acp-18-2097-2018>
- Zhang, H. et al., 2019. Surface erythemal UV irradiance in the continental United States derived from ground-based and OMI observations: quality assessment, trend analysis and sampling issues. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **19**, 2165–2181. <https://doi.org/10.5194/acp-19-2165-2019>
- Zou, K. H., et al., 2003. Correlation and simple linear regression. *Radiology*, **227**, 617–628. <https://doi.org/10.1148/radiol.2273011499>

CAPÍTULO 4

4 FOTOTIPOS CUTÂNEOS, EXPOSIÇÃO À RADIAÇÃO UV E VULNERABILIDADE SOCIOECONÔMICA

Este capítulo aborda a caracterização dos fototipos cutâneos da população residente na Região Geográfica Imediata de Manicoré, localizada no sul do Amazonas, e explora a relação entre os hábitos de fotoexposição, as práticas de fotoproteção e as condições socioeconômicas da região. Essas análises são essenciais para compreender os fatores de risco aos quais a população está exposta, bem como permite apontar lacunas nas políticas de saúde pública locais, buscando fornecer subsídios para o desenvolvimento de estratégias voltadas à educação e à conscientização sobre a importância da fotoproteção, especialmente para populações com menor acesso a cuidados médicos e proteção solar.

4.1 Materiais e Métodos

4.1.1 Descrição da área de estudo

Esta pesquisa foi realizada na Região Geográfica Imediata de Manicoré (RGIM), integrante da Região Intermediária de Lábrea (RIL), no estado do Amazonas, Brasil (IBGE, 2017). A coleta de dados concentrou-se nos municípios de Manicoré (48.300 km²), Novo Aripuanã (41.200 km²) e Apuí (54.200 km²) (Figura 4-1). Ressalta-se que apenas esses municípios se propuseram a colaborar com a cessão dos dados necessários para a presente pesquisa. Segundo o Censo Demográfico de 2022, realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), esses municípios apresentam populações de aproximadamente 54 mil habitantes em Manicoré (1,12 hab./km²), 24 mil em Novo Aripuanã (0,58 hab./km²) e 21 mil em Apuí (0,38 hab./km²) (IBGE, 2022).

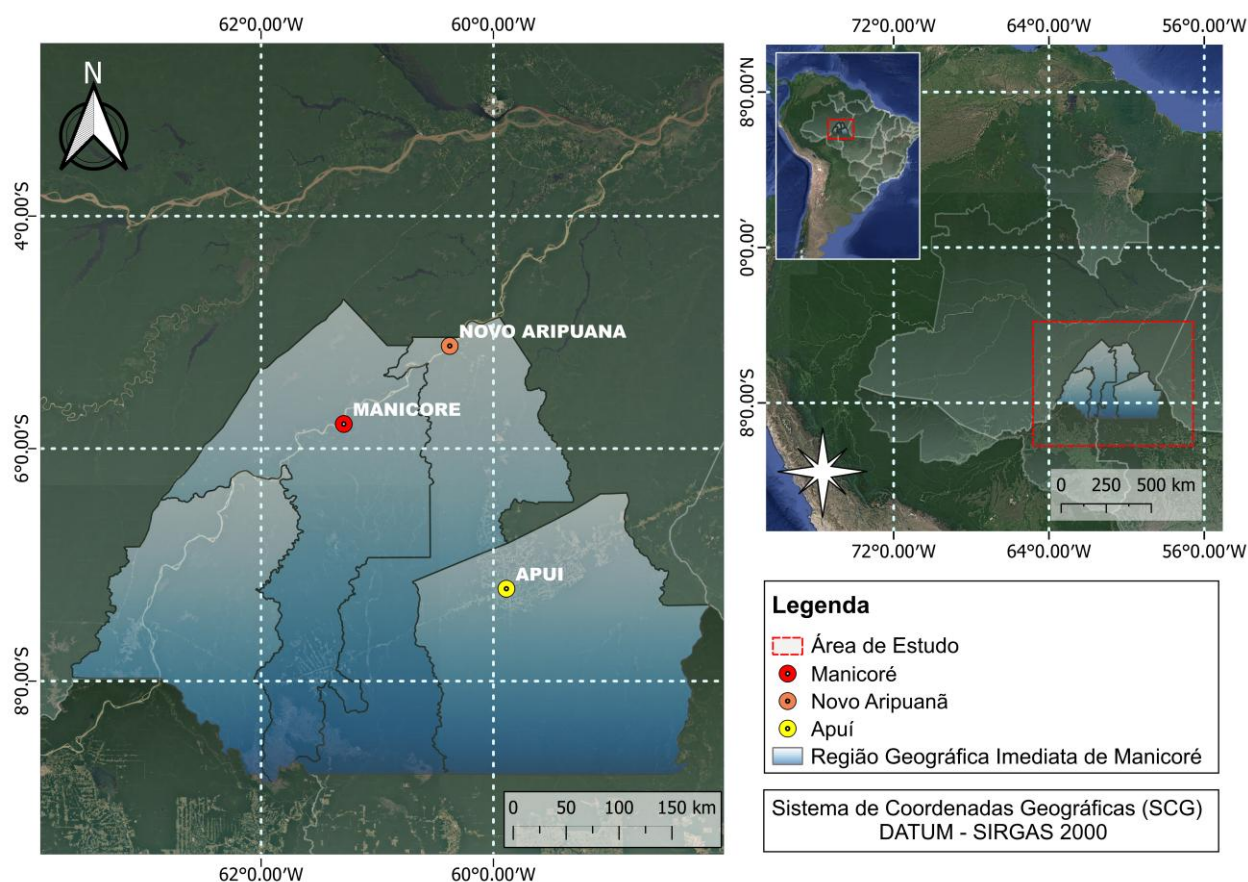


Figura 4-1 - Localização da área de estudo, com destaque para os municípios da região geográfica imediata de Manicoré, onde a coleta de dados foi realizada.

Esses municípios compartilham características comuns associadas à sua localização na Amazônia, como o clima tropical de monção (Am), marcado por três períodos distintos: chuvoso (outubro a abril), seco (junho a agosto) e de transição (maio e setembro) (Souza et al., 2022; Martins et al., 2023). A vegetação predominante é a floresta tropical, com vasta biodiversidade, enquanto a economia local baseia-se principalmente na agricultura de subsistência, pesca, extrativismo vegetal e mineral, e pecuária (Limberger & Silva, 2016).

O rendimento médio mensal dos trabalhadores formais varia entre 1,6 e 2,0 salários-mínimos, sendo que apenas 7,1 %, 8,8 % e 7,3 % da população de Manicoré, Novo Aripuanã e Apuí, respectivamente, possuem emprego formal (IBGE, 2022). Esses municípios também são atravessados por importantes rios, como o rio Madeira, essencial para o transporte e o escoamento de mercadorias, devido à limitação de acesso rodoviário (Tavares & Cordeiro, 2017). As populações dessas áreas enfrentam desafios relacionados ao isolamento geográfico, com

infraestrutura e serviços públicos frequentemente restritos, especialmente em comunidades ribeirinhas (Garnelo et al., 2020).

4.1.2 Coleta e tratamento dos dados

As informações sobre fototipos, hábitos de fotoexposição, práticas de fotoproteção e indivíduos em situação de vulnerabilidade socioeconômica foram obtidas a partir dos bancos de dados das Secretarias Municipais de Saúde (SEMSA) de Manicoré, Novo Aripuanã e Apuí. Esses dados referem-se ao ano de 2022, quando cada SEMSA, por meio de seus Agentes Comunitários de Saúde (ACS), realizou um inquérito domiciliar que abrangeu, ao todo, 1.442 indivíduos. Cada secretária levantou informações referentes a aproximadamente 3% de sua população urbana, com base no Censo Demográfico do IBGE de 2010. Foram inqueridos apenas indivíduos com 18 anos ou mais. As ferramentas de coleta adotadas contemplaram três eixos principais:

- (i) identificação do entrevistado;
- (ii) caracterização do fototipo e hábitos de fotoexposição;
- (iii) levantamento do perfil socioeconômico.

Para fins desta pesquisa, não houve acesso ao primeiro eixo, sendo analisadas apenas as informações dos dois últimos. As variáveis coletadas no segundo eixo estão apresentadas no Quadro 4-1.

Itens	Resposta
Cor natural dos cabelos	Louro; Ruivo; Castanho-Claro; Castanho-Escuro; Preto
Cor da íris	Azul; Azul e/ou Verde; Castanho-Claro; Castanho-Escuro; Preto
Exposto a radiação solar entre 10 e 15h	Sim; Não
Tempo médio de exposição	Até 15 minutos; De 15 a 30 minutos; Por mais de 30 minutos
Tipo ou ausência de fotoproteção	Sem proteção; Com FPS; Outros (camisa, chapéus, óculos escuro, guarda-sol, etc); Ambos (FPS+Outros)
Quando exposto por até 15 minutos	Queima facilmente e nunca bronzeia; Queima um pouco e bronzeia gradualmente; Não queima e bronzeia; Queima facilmente e bronzeia muito pouco; Raramente queima e bronzeia com facilidade; Bronzeia facilmente
Já teve queimadura solar	Sim; Não
Fototipo	I; II; III; IV; V; VI

Quadro 4-1 - Variáveis relacionadas aos hábitos de exposição à radiação solar e fatores genéticos para caracterizar os fototipos com base na escala de Fitzpatrick. Fonte. SEMSA (Manicoré, Novo Aripuanã e Apuí).

No terceiro eixo, foram consideradas as seguintes variáveis: números de moradores no domicílio, renda familiar bruta, grau de escolaridade do respondente, situação habitacional, e acesso aos serviços de saúde básica e especializada, conforme o Quadro 4-2.

Itens	Resposta
Número de pessoas residentes na casa	1; De 2 a 4; De 5 a 7; De 8 a 10; Mais de 10
Renda familiar bruta	< 1 SM; = 1 SM; $1 < SM \leq 1,5$; $1,5 < SM \leq 3$; $3 < SM \leq 5$; > 5 SM
Último grau de escolaridade	Sem escolaridade; Fundamental; Magistério; Médio; Médio +Técnico; Superior; especialização; Mestrado; Doutorado; Pós-Doutorado
Situação do imóvel	Próprio; Emprestado; Alugado
Acesso à saúde básica e especializada	SUS; Particular sem convênio; Particular com convênio
Vulnerabilidade	Sim; Não

Quadro 4-2 – Variáveis para o levantamento do perfil socioeconômico onde SM representa Salário-Mínimo. Fonte. SEMSA (Manicoré, Novo Aripuanã e Apuí).

4.1.3 Análise exploratória e estatística dos dados

As distribuições percentuais das populações quanto aos fototipos, hábitos de foto exposição, práticas de fotoproteção e indivíduos em situação de vulnerabilidade socioeconômica são apresentadas por meio de gráficos de barras. Adicionalmente, foi elaborado um histograma tridimensional com o objetivo de ilustrar o comportamento das frequências percentuais da população amostral em função da renda familiar bruta e do tempo de exposição solar.

Para investigar a associação entre vulnerabilidade socioeconômica e práticas de fotoproteção, foi construída uma tabela de contingência 2×2 , à qual se aplicou o teste do qui-quadrado de Pearson com correção de continuidade de Yates, considerando-se um nível de significância de 95% (Haber, 1980; Serra et al., 2019). Esse teste é útil para identificar a existência de associações estatisticamente significativas entre variáveis. Embora a amostra seja numerosa ($n = 1.442$), optou-se pela aplicação da correção de continuidade de Yates por se tratar de uma tabela 2×2 com valores esperados moderados, o que assegura maior rigor na interpretação estatística.

Uma vez detectada associação significativa (valor de $p < 0,05$), utilizou-se, em seguida, a Razão de Chances (*Odds Ratio*) (Andrade, 2023). Essa medida quantifica a força da associação, auxiliando na compreensão da magnitude do efeito e indicando o quanto é mais ou menos provável que um determinado grupo experimente um evento específico em comparação com outro (Hoffmann, 2016).

Neste manuscrito, adota-se o termo “vulnerabilidade socioeconômica” conforme empregado pelas SEMSA, que engloba fatores tais como renda familiar bruta, composição familiar, condições de moradia e acesso à educação e à saúde, informações essas obtidas por meio do inquérito domiciliar conduzido pelas referidas secretarias.

4.2 Resultados

4.2.1 Descrição dos fototipos cutâneos

Os fototipos III, IV e V apresentaram as maiores proporções (acima de 20%) dentro da amostra, sendo o fototipo V o de maior representatividade, com 29,8%. Os fototipos I, II e VI apresentaram proporções inferiores a 20%, destacando-se o fototipo I como o menos representativo, com apenas 1,3% (Figura 4-2a).

Com relação à exposição solar entre 10h e 15h, 48,4% dos indivíduos com fototipo I relataram ter o hábito de se expor ao sol nesse intervalo. Entre os fototipos II a IV, esse hábito é mantido por pelo menos 63% dos indivíduos de cada categoria, enquanto nos fototipos V e VI, pelo menos 53% também relataram exposição nesse horário (Figura 4-2b).

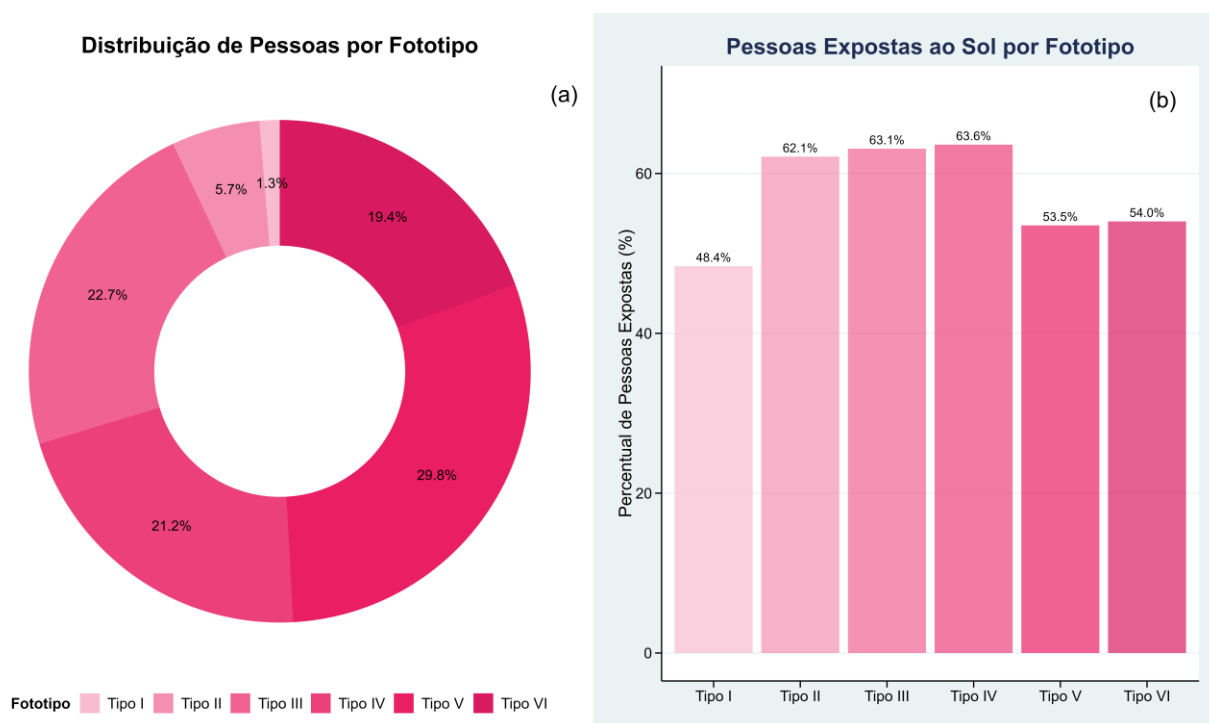


Figura 4-2 - Descrição dos fototipos cutâneos e pessoas expostas ao sol entre 10 e 15 horas, considerando os dados fornecidos pelas Secretarias Municipais de Saúde dos municípios de Manicoré, Apuí e Novo

Aripuanã. Em (a) Distribuição percentual dos fototipos; (b) Distribuição percentual por fototipo das pessoas expostas à radiação solar.

4.2.2 *Hábitos de exposição solar*

A Figura 4-3a mostra que 67% e 44% dos indivíduos com fototipos I e II, respectivamente, relataram exposição solar de até 15 minutos entre 10h e 15h. Para os demais fototipos, essa proporção variou entre 34% e 35%. A exposição com duração de 15 a 30 minutos foi semelhante entre todos os fototipos, oscilando entre 20% e 28%, enquanto a exposição superior a 30 minutos foi a mais frequente entre os fototipos III a VI, com destaque para o fototipo V, que apresentou a maior proporção, com 41%.

Indivíduos com fototipo I nunca se expõem ao sol sem proteção, independentemente da duração da exposição. Para exposições de até 15 minutos, 28% dos indivíduos com fototipo II não utilizam nenhum tipo de proteção, enquanto a proporção entre os demais fototipos é inferior a 17%. Em exposições de 15 a 30 minutos, as maiores proporções de exposição desprotegida ocorrem entre os fototipos IV (32%) e V (30%). Para exposições superiores a 30 minutos, mais de 25% dos indivíduos de cada fototipo, com exceção dos de fototipo I, não adotam quaisquer medidas de proteção.

De modo geral, pelo menos 72% dos indivíduos de cada fototipo (com exceção do fototipo I) que se expõem por até 15 minutos utilizam algum tipo de fotoproteção, como filtro solar, vestimentas, chapéus, entre outros. Para exposições superiores a 30 minutos, aproximadamente 62% adotam práticas fotoprotetoras (Figura 4-3b).

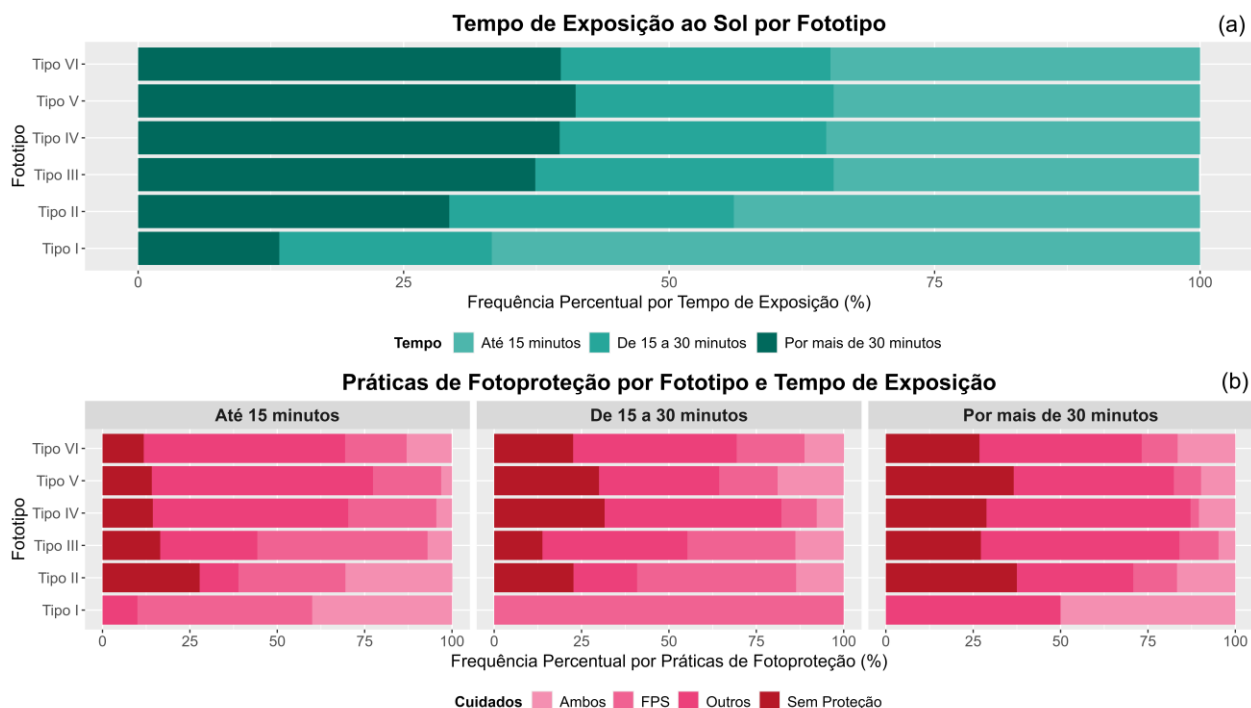


Figura 4-3 - Distribuição percentual, por fototipo, do intervalo de tempo de exposição ao sol em (a) e os cuidados e os cuidados de fotoproteção em (b). Destaca-se que o termo “Ambos” refere-se à adoção combinada de práticas de fotoproteção, englobando o uso de vestimentas protetoras (como camisas, chapéus e óculos escuros), associadas ao uso de filtro de proteção solar (FPS).

4.2.3 Práticas de fotoproteção e vulnerabilidade socioeconômica

A análise inicial da exposição solar em relação à renda familiar revelou que pouco mais de 50% da amostra se expõe ao sol por mais de 15 minutos e vive com uma renda inferior a três salários-mínimos (Figura 4-4). No entanto, ao considerar fatores que determinam a vulnerabilidade socioeconômica, como acesso à saúde, condições de moradia, composição familiar e níveis de escolaridade, constatou-se que 94,6% da amostra se enquadra nessa condição.

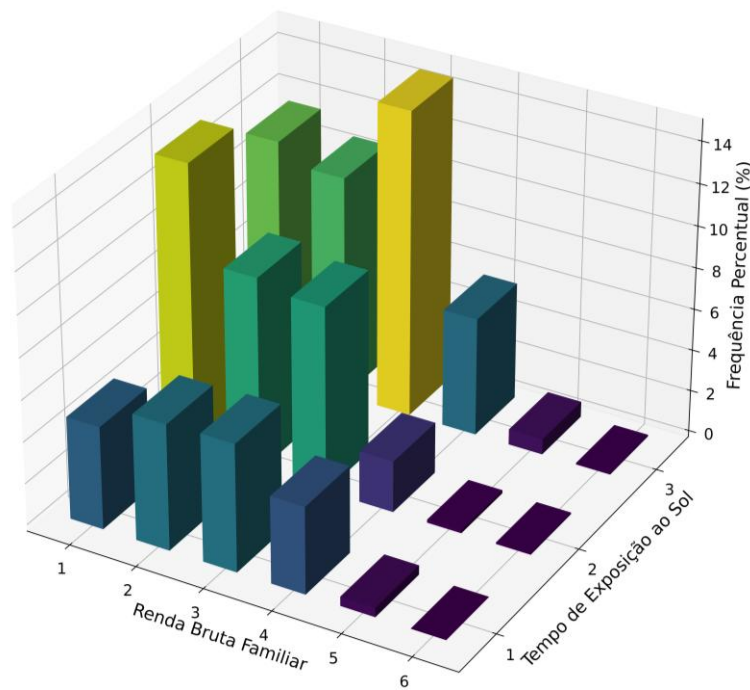


Figura 4-4 - Distribuição da amostra conforme intervalos de tempo de exposição solar e renda familiar bruta. Os valores 1, 2 e 3 no eixo Tempo de exposição ao Sol representam os intervalos de tempo de exposição solar até 15 minutos, entre 15 e 30 minutos e por mais de 30 minutos, respectivamente. Enquanto o eixo Renda Familiar Bruta indica em: 1 (renda menor que um salário-mínimo), 2 (renda igual a um salário-mínimo), 3 (renda de um até um e meio salário-mínimo), 4 (renda de um e meio a três salário-mínimo), 5 (renda de três a cinco salário-mínimo) e 6 (renda maior que cinco salário-mínimo). O eixo Z exibe a frequência de indivíduos em cada combinação de tempo de exposição e faixa de renda.

A Figura 4-5 ilustra que indivíduos com fototipo II que utilizam exclusivamente Filtro de Proteção Solar (FPS) apresentam os menores percentuais de vulnerabilidade socioeconômica, variando entre 60% e 67%, a depender da duração da exposição. Para os demais fototipos, essa proporção ultrapassa 73%, independentemente do tempo de exposição.

Indivíduos que utilizam formas alternativas de fotoproteção, como camisas, chapéus e óculos escuros, estão predominantemente em situação de vulnerabilidade socioeconômica, com pelo menos 93% dos casos, exceto entre os de fototipo II expostos por até 15 minutos, cuja proporção é de 75% (Figura 4-5).

Adicionalmente, ao se analisar cada fototipo separadamente, nota-se que o percentual mínimo de indivíduos em situação de vulnerabilidade socioeconômica que combinam o uso FPS com medidas alternativas de fotoproteção, como camisas, chapéus e óculos escuros, nunca é inferior a 80%.

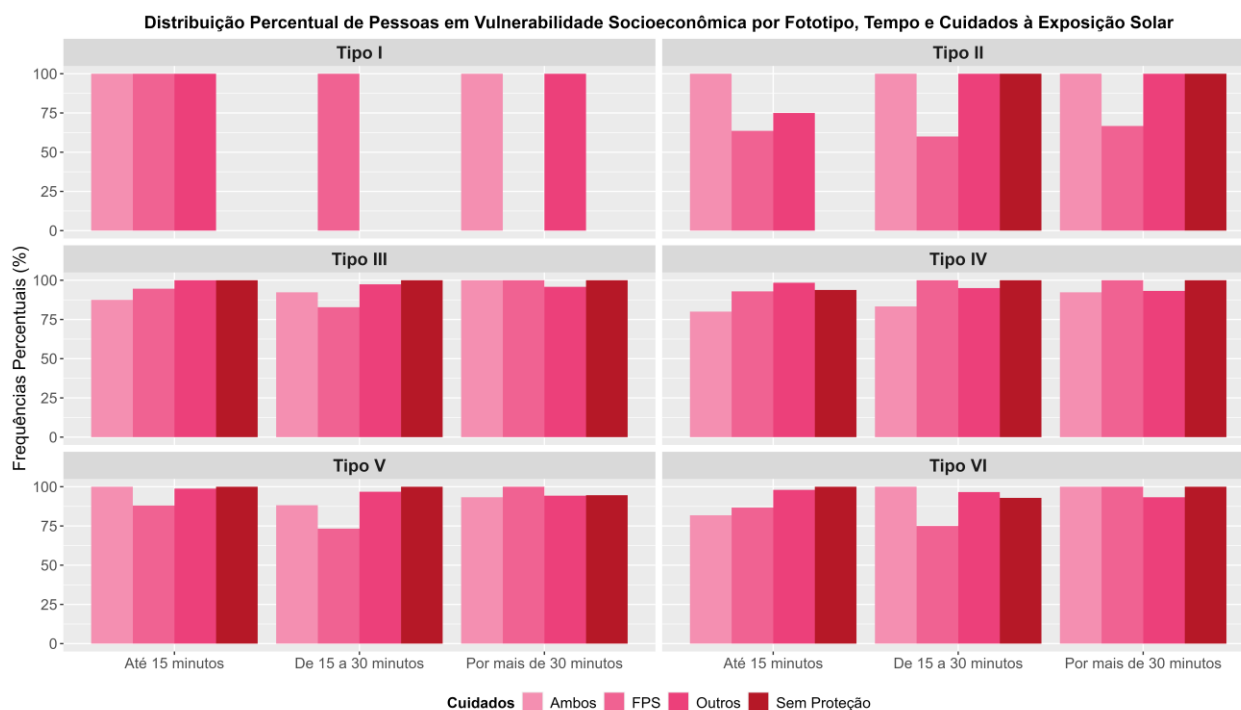


Figura 4-5 - Distribuição percentual de pessoas em situação de vulnerabilidade socioeconômica e suas práticas de fotoproteção. O gráfico ilustra a relação entre o nível de proteção solar adotado e a condição socioeconômica, destacando o comportamento da população vulnerável em termos de exposição ao sol e uso de medidas preventivas, como o uso de protetor solar, roupas adequadas e chapéu.

Considerando as proporções de indivíduos em situação de vulnerabilidade socioeconômica que adotam (76%) ou não (24%) práticas de fotoproteção, e de indivíduos não vulneráveis que as adotam (87,8%) ou não (12,2%), as análises indicam que a proporção de pessoas vulneráveis que não adotam medidas de fotoproteção é significativamente maior em comparação àquelas não vulneráveis. O teste do qui-quadrado de Pearson, com correção de continuidade de Yates, revelou uma associação estatisticamente significativa entre vulnerabilidade socioeconômica e práticas de fotoproteção (valor de $p = 0,02$). A direção dessa associação indica que indivíduos em situação de vulnerabilidade socioeconômica tem maior probabilidade de não adotar medidas de proteção solar, em comparação àqueles que não se encontram nessa condição. Esse resultado é sustentado pelo *Odds Ratio* obtido, igual a 2,28, com intervalo de confiança de 95 % entre 1.12 e 4.63. Em outras palavras, pessoas em vulnerabilidade socioeconômica têm 2,28 vezes mais chance de não adotar práticas de fotoproteção em relação àquelas que não estão em situação de vulnerabilidade. Com isso, reforça-se a premissa de que a vulnerabilidade socioeconômica é um fator relevante para a menor adesão às práticas de fotoproteção.

4.3 Discussão

4.3.1 Descrição dos fototipos

Indivíduos com pele melanocomprometida (fototipos I e II), caracterizados por tons de pele muito claros e baixa produção de melanina, são altamente suscetíveis aos danos causados pela radiação UV. Esse grupo representa apenas 7% da amostra analisada. Em contrapartida, indivíduos com pele melanocompetente (fototipos III e IV), com tons de pele de claros a médios e maior produção de melanina, correspondem a 43,9% da amostra e apresentam maior proteção contra a radiação UV. Já os indivíduos melanoprotégidos (fototipos V e VI), com tons de pele de castanho-escuro a preto, representam cerca de 50% da amostra e possuem o mais elevado nível de proteção natural contra a radiação UV, reduzindo significativamente o risco de queimaduras solares. Em síntese, quanto maior a concentração de melanina (fototipos mais elevados), maior é a proteção natural contra os danos provocados pela radiação ultravioleta (Fitzpatrick, 1988; Araújo et al., 2014; Al-Sadek & Yusuf, 2024).

Diferentemente da classificação de Fitzpatrick (1988), o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) adota critérios baseados na cor ou raça para identificar a população brasileira, refletindo aspectos de etnia e percepção de cor. A população é categorizada em cinco grupos: branca, preta, parda (mestiça), amarela e indígena. De acordo com o último censo, nas cidades analisadas, a distribuição populacional por cor/raça foi a seguinte: branca (18,1%), preta (5,3%), parda (72,1%), amarela (0,1%) e indígena (4,4%) (IBGE, 2020).

A classificação do IBGE, de natureza sociocultural e subjetiva, apresenta limitações na descrição das características físicas e da sensibilidade à radiação solar, por basear-se em autodeclarações. Em contraste, a escala de Fitzpatrick, embora não represente plenamente a diversidade de tonalidades de pele em populações miscigenadas como as da Amazônia, oferece vantagens para pesquisas dermatológicas e de fotoproteção no Brasil, incluindo a estimativa da Dose Mínima Eritematosa (MED, sigla do inglês *Minimal Erythmal Dose*) (Quadro 2-2). Reconhecida pela Sociedade Brasileira de Dermatologia (SBD), a escala é considerada uma ferramenta valiosa para orientar políticas de fotoproteção, ressaltando a importância dos cuidados com a exposição solar para todos os fototipos (SBD, 2021b).

A proposta de inclusão da escala de Fitzpatrick no censo do IBGE é respaldada por dados que evidenciam a necessidade de revisão da atual classificação. O Instituto Nacional de Câncer

(INCA) projeta que o câncer de pele não melanoma (NMSC, sigla do inglês *Non-Melanoma Skin Cancer*) continuará sendo o tipo mais prevalente de câncer no Brasil, com um aumento significativo de 4,3 pontos percentuais entre os triênios de 2020–2022 e 2023–2025 (INCA, 2019; INCA, 2022). Embora o NMSC apresente menor letalidade em comparação ao melanoma, sua prevalência é significativamente mais elevada (Ferlay et al., 2021).

As tendências crescentes na incidência do NMSC no Brasil são evidentes e, consequentemente, têm resultado no aumento da mortalidade associada a essa neoplasia. Segundo Nascimento et al. (2022), foram registradas 27.550 mortes por NMSC no país, com maior proporção entre os homens (58,1%) e indivíduos com 70 anos ou mais, que representaram 64,3% dos casos notificados. Ademais, os autores destacaram que as regiões Norte e Nordeste do Brasil apresentaram tendências significativas de aumento nas taxas de mortalidade, refletindo uma distribuição regional heterogênea do impacto da doença no território nacional.

Em escala global, Bray et al. (2024) relataram que a incidência estimada de NMSC em 2022 alcançou aproximadamente 1,2 milhão de casos em todo o mundo, com cerca de 70 mil mortes atribuídas a essa neoplasia. De forma semelhante, Kerob et al. (2024) documentaram 63.731 óbitos relacionados ao NMSC em 2020, destacando que essa problemática vem ganhando relevância não apenas em regiões específicas, mas em âmbito mundial. Um estudo recente projetou que a incidência, os óbitos e os anos de vida ajustados por incapacidade (DALYs) associados ao NMSC aumentarão, globalmente, em pelo menos 1,5 vez entre 2020 e 2044 (Hu et al., 2022).

Em relação ao melanoma maligno, tipo de câncer de pele menos comum, porém significativamente mais letal quando não diagnosticado precocemente, mais de 47 mil óbitos por essa neoplasia foram registrados no Brasil entre 1979 e 2022 (Zanoni et al., 2023). Além disso, observou-se uma tendência significativa de aumento anual, com 39 óbitos adicionais por ano no país. Na região Norte, foram registrados 985 óbitos no mesmo período, com um incremento anual significativo de 1,12 morte. Nos municípios analisados, apenas dois casos fatais foram registrados: um em Apuí (2017) e outro em Humaitá (2021) (Mélo et al., 2019; Silva et al., 2020; INCA, 2024). A ausência de dermatologistas nas cidades do interior do Amazonas, tanto no sistema público de saúde (SUS) quanto no setor privado, dificulta o diagnóstico, o que pode contribuir para a subnotificação dos casos, sejam de NMSC ou de melanoma.

Em Humaitá, dentro da Região Geográfica Imediata de Manicoré (RGIM), um dermatologista realiza atendimentos a cada 15 dias, o que possibilitou a criação de um banco de

dados que registrou, entre 2016 e 2020, 47 casos de NMSC, 2 casos de melanoma e 50 casos de queilite actínica — lesão pré-maligna no lábio inferior (Alves, 2020). Dados dos inquéritos domiciliares realizados pelas SEMSA indicam que 19% da amostra relatou queimaduras solares, o que reforça a necessidade de profissionais especializados, uma vez que as notificações dependem diretamente do diagnóstico. Na RGIM, os casos suspeitos de melanoma ou NMSC, com exceção de Humaitá, são encaminhados para Manaus (AM) ou Porto Velho (RO), municípios que registraram, entre 1979 e 2022, respectivamente, 196 e 37 óbitos por melanoma maligno, ambos com tendências crescentes significativas (INCA, 2024).

O agravamento das neoplasias cutâneas no Brasil, em especial na região Norte, onde a subnotificação é intensificada pela escassez de especialistas e pela insuficiência de infraestrutura (Garnelo et al., 2020), evidencia a necessidade de discutir a forma de coleta das informações sobre cor da pele (Szklo et al., 2007), bem como de reavaliar a escala utilizada nos próximos censos.

4.3.2 Fatores que influenciam os hábitos de exposição

As diferenças nos hábitos de exposição solar e nas práticas de fotoproteção entre os fototipos decorrem dos níveis de melanina, os quais variam ao longo dos seis fototipos (Fitzpatrick, 1988; Kullavanijaya & Lim, 2005; Al-Sadek & Yusuf, 2024). Indivíduos com fototipos mais elevados (III a VI), menos propensos a queimaduras solares, tendem a perceber um risco imediato menor e, portanto, tendem a ficarem expostos ao sol por períodos mais prolongados (Young et al., 2017; Rigel et al., 2022)

As elevadas proporções de exposição solar prolongada nas cidades do interior do Amazonas estão associadas às atividades ocupacionais predominantes (Marehbian et al., 2007; Radespiel-Tröger et al., 2009; Kütting & Drexler, 2010), como agricultura de subsistência, pesca, criação de animais, extração de recursos naturais, artesanato e prestação de serviços, todas vinculadas aos recursos locais e aos modos de vida tradicionais (Lima & Pozzobon, 2005; Ceballos et al., 2014; Costa et al., 2022). O uso frequente de motocicletas e bicicletas como meios de transporte urbano também contribui para o aumento da exposição solar durante os deslocamentos diários. Esses fatores, que refletem as condições socioeconômicas e culturais da região, ressaltam a importância da adoção de práticas eficazes de fotoproteção na avaliação dos comportamentos de exposição solar entre os diferentes fototipos da população (Modenese et al., 2018).

Com relação à carga de NMSC atribuível à exposição ocupacional à radiação ultravioleta solar, a Organização Mundial da Saúde (OMS) estimou que, em 2019, aproximadamente 18.960 dos 65.440 óbitos por NMSC estavam relacionados a esse tipo de exposição (Sung et al., 2021). Pega et al. (2023) destacaram que, entre 2000 e 2019, os óbitos por NMSC decorrentes de exposição ocupacional à radiação ultravioleta solar aumentaram 87,9% em escala global. Segundo os autores, os homens foram os mais afetados, e tanto o número quanto a taxa de mortes aumentaram com a idade, atingindo o pico entre 65 e 69 anos, devido à latência da doença.

Esses dados globais ressaltam o impacto significativo da exposição ocupacional à radiação ultravioleta solar no aumento dos óbitos por NMSC. A realidade da região amazônica, caracterizada por atividades econômicas que demandam longas jornadas de trabalho ao ar livre, agrava a suscetibilidade das populações locais. A ausência de medidas preventivas eficazes e a carência de infraestrutura em saúde especializada, como a escassez de dermatologistas, agravam ainda mais o cenário. Diante disso, torna-se urgente a implementação de estratégias de fotoproteção adaptadas às condições regionais, bem como a promoção de campanhas de conscientização voltadas à prevenção, especialmente entre os trabalhadores expostos, a fim de mitigar os impactos da exposição solar e reduzir a carga futura do NMSC na Amazônia e em outras regiões com características semelhantes.

A oferta e a retenção de profissionais de saúde na atenção primária em áreas de difícil acesso do Amazonas permanecem como um desafio persistente. Desde a década de 1970, políticas públicas têm buscado enfrentar a dificuldade de atrair e manter médicos generalistas e, especialmente, especialistas na região amazônica, por meio de programas voltados tanto à formação quanto à fixação desses profissionais (Dolzane & Schweickardt, 2020). Essa problemática impacta negativamente os municípios do estado do Amazonas, devido a fatores como o acesso limitado às comunidades, a dispersão populacional, as grandes distâncias geográficas, a infraestrutura local inadequada e a ausência de formação especializada para os profissionais que atuam nesse contexto (Garnelo et al., 2020).

A criação do Programa Mais Médicos pelo governo federal brasileiro, em 2013, trouxe mudanças significativas para esse cenário. O principal objetivo do programa visa ampliar o acesso à atenção básica à saúde em áreas prioritárias do Sistema Único de Saúde (SUS), especialmente em regiões remotas, vulneráveis ou desassistidas, tendo promovido avanços notáveis no enfrentamento desses desafios históricos (Lima et al., 2016).

Nesse contexto de avanços, países como Austrália, Reino Unido e Canadá têm adotado estratégias inovadoras, incluindo a integração de outros profissionais de saúde, como clínicos gerais, no cuidado e na prevenção das neoplasias cutâneas. A capacitação desses profissionais para a identificação precoce de lesões cutâneas suspeitas tem contribuído significativamente para o sucesso dessas nações, refletido em suas notavelmente baixas razões de mortalidade por incidência para essas condições.

Embora as medidas gerais de fotoproteção sejam amplamente adotadas, a adesão ao uso de filtro solar com Fator de Proteção Solar (FPS) é baixa. O uso adequado, incluindo a escolha do tipo ideal para cada fototipo e a aplicação na quantidade correta (Krutmann et al., 2020; Passeron et al., 2021), é fundamental para a proteção contra queimaduras solares associadas ao UVB, fotoenvelhecimento, câncer de pele, danos ao DNA e fotodermatoses agravadas pela radiação UVA (Moyal & Fourtanier, 2001; Eleftheratos et al., 2020; Saucedo et al., 2020; Krutmann et al., 2021; Shetty et al., 2023). O uso regular do FPS é essencial em todas as estações do ano, embora estudos indiquem uma redução em sua aplicação durante o inverno, quando a necessidade de proteção costuma ser subestimada (Benvenuto-Andrade et al., 2005; Janssen et al., 2012).

Neste estudo, constatou-se a predominância de indivíduos com fototipos mais elevados, classificados como melanocompetentes e melanoprotégidos, que reflete as características de populações com pele mais pigmentada (*skin of color*), as quais possuem maior proteção natural contra os efeitos da radiação UVB devido à maior concentração de melanina. No entanto, estudos indicam que esses indivíduos permanecem suscetíveis à hiperpigmentação induzida pela radiação UVA e à pigmentação causada pela luz visível (Mahmoud et al., 2010; Duteil et al., 2014; Kohli et al., 2018; Dlova et al., 2019). A baixa adesão ao uso de protetor solar observada neste estudo evidencia a necessidade de estratégias educativas voltadas não apenas aos fototipos mais sensíveis à radiação solar, mas também aos fototipos mais elevados, que historicamente têm recebido menos informações sobre fotoproteção (Marionnet et al., 2017; Suarez et al., 2017; Passeron et al., 2021).

Além de evitar exposição solar nos horários de pico, o uso de protetores solares adequados, com razão UVA-PF/FPS $\geq 2/3$ e formulações com cor, para proteção contra a luz visível, é essencial para a prevenção de distúrbios hiperpigmentares e outros danos dermatológicos (Seck et al., 2023). Campanhas de conscientização direcionadas a populações de todos os fototipos, adaptadas às características regionais, são cruciais para mitigar os impactos cumulativos da exposição solar. Tais iniciativas devem alinhar as práticas de fotoproteção às evidências científicas

globais, especialmente em regiões onde a irradiância UVA tem apresentado tendências significativas de aumento, como observado na mesorregião sul do Amazonas, conforme evidenciado por Alves et al. (2025).

No Brasil, as políticas públicas voltadas ao uso de protetor solar ainda são limitadas. A Lei nº 14.539/23, em vigor desde setembro de 2023, instituiu a Campanha Nacional de Prevenção da Exposição Indevida ao Sol, com o objetivo de conscientizar a população sobre os riscos da exposição solar e garantir o acesso ao protetor solar pelo Sistema Único de Saúde (SUS) para pessoas com condições agravadas pela radiação solar e trabalhadores em atividades externas (Brasil, 2023). Paralelamente, campanhas como o “Dezembro Laranja”, promovida pela Sociedade Brasileira de Dermatologia (SBD), e iniciativas do Instituto Nacional de Câncer (INCA) reforçam a importância da fotoproteção (SBD, 2021a,b; Santos et al., 2023).

Destaca-se também o Projeto de Lei nº 8033/17, aprovado por comissões na Câmara dos Deputados, que propõe a oferta gratuita, pelo SUS, de protetor solar e óculos escuros para pessoas com albinismo (Brasil, 2017). O projeto prevê ainda a disponibilização de vestimentas com fator de proteção solar (FPS 50 ou superior) para essa população, enfatizando a necessidade de cuidados especiais diante da elevada suscetibilidade aos danos induzidos pela radiação ultravioleta.

No Amazonas, o programa “Atualiza Pescador” distribuiu, em 2023, 1.100 kits de fotoproteção para pescadores de 19 municípios. Em 2024, o programa foi ampliado, com a entrega de 2.100 kits. As próximas fases têm como objetivo alcançar todos os 62 municípios do estado. Os kits incluem camisas com proteção UV, protetor solar e chapéus de palha, contribuindo para a proteção da saúde dos pescadores expostos ao sol durante suas atividades diárias (SEPROR, 2023).

Embora campanhas de fotoproteção sejam incomuns nas cidades do interior do Amazonas, em especial na Região Geográfica Imediata de Manicoré (RGIM), a exposição solar intensa e frequente na região exige maior atenção por parte das autoridades de saúde (Nascimento et al., 2022). Para expandir essas iniciativas, é fundamental continuar investindo em programas de saúde pública e reduzir as barreiras econômicas ao acesso ao FPS, especialmente entre populações de baixa renda e trabalhadores em atividades externas (Costa et al., 2022).

4.3.3 Práticas de fotoproteção em contextos de vulnerabilidade socioeconômica

A exposição solar prolongada na Região Geográfica Imediata de Manicoré (RGIM), frequentemente associada a atividades ocupacionais e a condições econômicas desfavoráveis

(Modenese et al., 2018), requer atenção das autoridades locais devido ao seu papel no aumento do risco de câncer de pele, tanto do tipo melanoma quanto do tipo não melanoma (Mesquita et al., 2020). Mesmo em cenários menos graves, podem ocorrer lesões cutâneas menos agressivas, mas ainda assim prejudiciais (Saucedo et al., 2020). O investimento em campanhas e subsídios que promovam a adesão às práticas de fotoproteção desponta como uma estratégia eficaz na prevenção dessas patologias (Mesquita et al., 2020).

O diagnóstico precoce das neoplasias cutâneas e o início imediato do tratamento são fundamentais para um prognóstico favorável (Passeron et al., 2021). No entanto, esse processo representa um ônus significativo para os recursos públicos, uma vez que as populações de baixa renda, que dependem predominantemente do Sistema Único de Saúde (SUS), enfrentam processos de diagnósticos mais lentos (Mesquita et al., 2020). Esses processos incluem consulta ambulatorial, encaminhamento, biópsia, análise histopatológica, diagnóstico e tratamento, sendo que atrasos em qualquer uma dessas etapas podem representar risco à vida. Em contraste, indivíduos com maior nível socioeconômico têm maior acesso a tratamentos de melhor qualidade e a medidas de fotoproteção mais eficazes (Abdel-Rahman, 2020; Mesquita et al., 2020).

O tratamento do câncer de pele, o tipo mais comum no Brasil, representa um considerável ônus financeiro para o Sistema Único de Saúde (SUS). No estado de São Paulo, o custo médio anual por paciente foi estimado em R\$ 1.172 para o câncer de pele não melanoma e R\$ 13.062 para o melanoma cutâneo no SUS, enquanto nos sistemas de saúde suplementar os custos foram de R\$ 1.040 e R\$ 26.668, respectivamente (Souza et al., 2011). Apesar dos custos individuais mais baixos associados ao câncer de pele não melanoma, sua alta prevalência impõe uma carga financeira significativa ao sistema de saúde. Esse impacto é ainda mais agravado pelo aumento dos custos médicos e pela complexidade dos recursos exigidos nos casos de melanoma.

Avanços recentes, como a aprovação da terapia fotodinâmica pelo Sistema Único de Saúde (SUS), oferecem novas perspectivas no enfrentamento do câncer de pele. Esse tratamento inovador, desenvolvido pela Universidade de São Paulo (USP), representa uma mudança significativa na abordagem das neoplasias cutâneas (Salvio et al., 2022). A técnica permite o tratamento do câncer de pele não melanoma sem a necessidade de cirurgia, utilizando luz para ativar um fármaco fotossensibilizante que destrói seletivamente as células cancerígenas (Salvio et al., 2024; Salvio et al., 2024). Além de ser menos invasiva, a terapia reduz complicações pós-tratamento e pode gerar economia de custos para o SUS.

Esse cenário evidencia a importância de estratégias preventivas e do diagnóstico precoce, que são mais viáveis do ponto de vista econômico e reduzem o impacto do câncer de pele sobre a saúde pública. Campanhas educativas, políticas de fotoproteção e o acesso equitativo a inovações como a terapia fotodinâmica no SUS reforçam o papel dos avanços científicos na promoção de tratamentos oncológicos mais acessíveis e eficazes.

No entanto, a adoção dessas estratégias preventivas não é uniforme entre os diferentes segmentos da população. A Razão de Chances (*Odds Ratio*) de 2,28, com intervalo de confiança de 95% variando de 1,12 a 4,63, indica que indivíduos em situação de vulnerabilidade socioeconômica têm 2,28 vezes mais chances de não aderirem às práticas de fotoproteção quando comparados àqueles em condições mais favoráveis. Esse resultado ressalta a relevância da vulnerabilidade socioeconômica como fator determinante para a menor adesão a essas práticas (Oliveira, 2013).

Indivíduos socialmente vulneráveis diagnosticados com melanoma apresentam maior risco de não receberem tratamento cirúrgico e de manifestarem a doença em estágio avançado (McC Campbell et al., 2024). Esse cenário reflete as barreiras de acesso aos serviços de saúde e a especialistas enfrentadas por essas populações, conforme documentado na literatura (Abdel-Rahman, 2020; Garnelo et al., 2020).

Embora o NMSC apresente, em termos relativos, menor impacto em taxas e números de mortalidade — devido ao seu prognóstico favorável e baixa taxa de metástase —, sua incidência tem apresentado crescimento constante, tanto em contextos regionais, como os analisados neste estudo, quanto em escala internacional (Ciuciulete et al., 2022). Globalmente, o NMSC já é responsável por um número maior de óbitos do que o melanoma, amplamente reconhecido como a forma mais agressiva de câncer de pele (Arnold et al., 2022; Bray et al., 2024).

Adicionalmente, especialistas ressaltam que os casos de NMSC são significativamente subnotificados, o que sugere que a real carga dessa neoplasia pode ser ainda maior do que os dados atuais indicam (WCRFI, 2022). Essa particularidade assume especial relevância no contexto deste estudo, considerando-se as especificidades anteriormente mencionadas da região analisada.

Os cânceres de pele representam uma importante questão de saúde pública na prática médica, apesar de serem, em grande medida, evitáveis e tratáveis. No entanto, a prevenção da progressão dessas neoplasias exige um esforço coletivo. As razões para as recentes reduções na incidência ainda estão em debate, mas provavelmente refletem uma combinação de mudanças no

estilo de vida e no comportamento social, impulsionadas por campanhas educativas que estimulam e conscientizam a população sobre a importância da adoção de práticas eficazes de fotoproteção.

Essas práticas incluem evitar a exposição solar nos horários de maior intensidade, buscar sombra, utilizar roupas com proteção solar e chapéus de abas largas, além de aplicar o protetor solar de forma correta e regular. A sensibilização da população sobre essas medidas é fundamental para a redução da carga associada a essas doenças.

4.4 Considerações Finais

Os achados deste estudo ressaltam a urgente necessidade de estratégias públicas direcionadas para mitigar os riscos da exposição solar na Região Geográfica Imediata de Manicoré. A predominância de fototipos melanoprotégidos e melanocompetentes, aliada à baixa adesão ao uso de protetor solar e à presença de vulnerabilidades socioeconômicas, evidencia a importância de enfrentar as barreiras econômicas, por meio de campanhas educativas, distribuição de produtos de fotoproteção e capacitação de profissionais de saúde.

A integração da escala de Fitzpatrick em levantamentos nacionais pode aprimorar a identificação de grupos suscetíveis aos efeitos nocivos devido a radiação UV, possibilitando intervenções mais eficazes. Além disso, a ampliação dos serviços de dermatologia e a implantação de redes de diagnóstico precoce em áreas remotas são medidas essenciais para reduzir a carga do câncer de pele, melhorar o manejo dos casos e enfrentar a subnotificação em populações vulneráveis.

4.5 Referências do Capítulo

- Abdel-Rahman, O., 2020. Prognostic impact of socioeconomic status among patients with malignant melanoma of the skin: a population-based study. *Journal of Dermatological Treatment*, **31**, 571–575. <https://doi.org/10.1080/09546634.2019.1657223>
- Al-Sadek, T. & Yusuf, N., 2024. Ultraviolet radiation biological and medical implications. *Current Issues in Molecular Biology*, **46**, 1924–1942. <https://doi.org/10.3390/cimb46030126>
- Alves, P. V., 2020. *Sazonalidade do índice ultravioleta na cidade de Humaitá-AM: contribuições para prevenção do câncer de pele*, (Dissertação de mestrado, Universidade federal do Amazonas).
- Alves, P. V., et al., 2025. Seasonal variations and trends in solar UV spectral irradiances based on data from the Ozone Monitoring Instrument at solar noon in Southern Amazonas, Brazil.

- Remote Sensing Applications: Society and Environment*, **37**, 101423. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2024.101423>
- Andrade, C., 2023. How to understand the 95% confidence interval around the relative risk, odds ratio, and hazard ratio: as simple as it gets. *The Journal of Clinical Psychiatry*, **84**, 47304. <https://doi.org/10.4088/jcp.23f14933>
- Araújo, M. et al., 2014. Natural melanin: A potential pH-responsive drug release device. *International journal of pharmaceutics*, **469**, 140–145. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2014.04.051>
- Arnold, M. et al., 2022. Global Burden of Cutaneous Melanoma in 2020 and Projections to 2040. *JAMA Dermatol*, **158**, 495–503. <https://doi.org/10.1001/jamadermatol.2022.0160>
- Benvenuto-Andrade, C. et al., 2005. Sun Exposure and Sun Protection Habits Among High-school Adolescents in Porto Alegre, Brazil. *Photochemistry and photobiology*, **81**, 630–635. <https://doi.org/10.1111/j.1751-1097.2005.tb00236.x>
- Brasil, Câmara do Deputados, 2017. *Projeto de Lei nº 8.033, de 05 de julho de 2017*. <https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/fichadetramitacao?idProposicao=2143883&fichaAmigavel=nao>. (Acessado em 23 de fevereiro de 2025).
- Brasil, Câmara dos Deputados, 2023. *Lei nº 14.539, de 31 de março de 2023*. <https://legislacao.presidencia.gov.br/atos/?tipo=LEI&numero=14539&ano=2023&ato=08bQTRU10MZpWT2a0>. (Acessado em 23 de fevereiro de 2025).
- Bray, F. et al., 2024. Global cancer statistics 2022: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries. *CA: a cancer journal for clinicians*, **74**, 229–263. <https://doi.org/10.3322/caac.21834>
- Ceballos, A. G. C. et al., 2014. Exposição solar ocupacional e câncer de pele não melanoma: estudo de revisão integrativa. *Revista Brasileira de Cancerologia*, **60**, 251–258. <https://doi.org/10.32635/2176-9745.RBC.2014v60n3.472>
- Ciuciulete, A. R., et al., 2022. Non-Melanoma Skin Cancer: Statistical Associations between Clinical Parameters. *Curr Health Sci J*, **48**, 110–115. <https://doi.org/10.12865/CHSJ.48.01.16>
- Costa, R. C. et al., 2022. Incentivo à prevenção primária do câncer de pele na região amazônica: percepções acerca dos riscos e vulnerabilidades. *Research, Society and Development*, **11**, e58511629355. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i6.29355>
- Dlova, N. C., et al., 2019. Prevalence of pigmentary disorders: A cross-sectional study in public hospitals in Durban, South Africa. *International journal of women's dermatology*, **5**, 345–348. <https://doi.org/10.1016/j.ijwd.2019.07.002>
- Dolzane, R. S. & Schweickardt, J. C., 2020. Atenção básica no Amazonas: provimento, fixação e perfil profissional em contextos de difícil acesso. *Trab. educ. saúde*, **18**, e00288120. <https://doi.org/10.1590/1981-7746-sol00288>
- Duteil, L. et al., 2014. Differences in visible light-induced pigmentation according to wavelengths: a clinical and histological study in comparison with UVB exposure. *Pigment cell & melanoma research*, **27**, 822–826. <https://doi.org/10.1111/pcmr.12273>

- Eleftheratos, K. et al., 2020. Possible effects of greenhouse gases to ozone profiles and DNA active UV-B irradiance at ground level. *Atmosphere*, **11**, 228. <https://doi.org/10.3390/atmos11030228>
- Ferlay, J. et al., 2021. Cancer statistics for the year 2020: An overview. *International journal of cancer*, **149**, 778–789. <https://doi.org/10.1002/ijc.33588>
- Fitzpatrick, T. B., 1988. The validity and practicality of sun-reactive skin types I through VI. *Archives of dermatology*, **124**, 869–871. <https://doi.org/10.1001/archderm.1988.01670060015008>
- Garnelo, L. et al., 2020. Barriers to access and organization of primary health care services for rural riverside populations in the Amazon. *International Journal for Equity in Health*, **19**, 1–14. <https://doi.org/10.1186/s12939-020-01171-x>
- Haber, M., 1980. A comparison of some continuity corrections for the chi-squared test on 2×2 tables. *Journal of the American Statistical Association*, **75**, 510–515. <https://doi.org/10.1080/01621459.1980.10477503>
- Hoffmann, R., 2016. Odds Ratio versus Razão de Prevalências ou Modelo de Lógite versus Regressão de Poisson. *Segurança Alimentar e Nutricional*, **23**, 816–825. <https://doi.org/10.20396/san.v23i1.8647217>
- Hu, W. et al., 2022. Changing trends in the disease burden of non-melanoma skin cancer globally from 1990 to 2019 and its predicted level in 25 years. *BMC Cancer*, **22**, 836. <https://doi.org/10.1186/s12885-022-09940-3>
- IBGE, 2017. *Divisão regional do Brasil*. <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/divisao-regional/15778-divisoes-regionais-do-brasil.html>. (Acessado em 12 de setembro de 2023).
- IBGE, 2020. *Conceitos e métodos*. <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/22827-censo-demografico-2022.html?edicao=38698&t=conceitos-e-metodos>. (Acessado em 11 de março de 2023).
- IBGE, 2022. *Cidades e estados do Brasil*. <https://cidades.ibge.gov.br/>. (Acessado em fevereiro de 2023).
- INCA, 2019. *Estimativa 2020: incidência de câncer no Brasil*. Rio de Janeiro, Brazil: INCA.
- INCA, 2022. *Estimativa 2023: incidência de câncer no Brasil*. Rio de Janeiro, Brazil: INCA.
- INCA, 2024. *Atlas On-line de Mortalidade*. <https://mortalidade.inca.gov.br/MortalidadeWeb/>. (Acessado em 20 janeiro de 2024).
- Janssen, E. et al., 2012. Zonbescherming tijdens de wintersport: Een analyse van gedrag en determinanten. *Tijdschrift voor gezondheidswetenschappen*, **90**, 112–118. <https://doi.org/10.1007/s12508-012-0043-7>
- Kerob, D. et al., 2024. A comprehensive analysis of global skin cancer incidence and mortality with a focus on dermatologist density and population risk factors. *Journal of the American Academy of Dermatology*, **91**, AB102.

- Kohli, I. et al., 2018. Synergistic effects of long-wavelength ultraviolet A1 and visible light on pigmentation and erythema. *British Journal of Dermatology*, **178**, 1173–1180. <https://doi.org/10.1111/bjd.15940>
- Krutmann, J. et al., 2020. Photoprotection of the future: challenges and opportunities. *Journal of the European Academy of Dermatology and Venereology*, **34**, 447-454. <https://doi.org/10.1111/jdv.16030>
- Krutmann, J. et al., 2021. Daily photoprotection to prevent photoaging. *Photodermatology, Photoimmunology & Photomedicine*, **37**, 482-489. <https://doi.org/10.1111/phpp.12688>
- Kullavanijaya, P. & Lim, H. W., 2005. Photoprotection. *Journal of the American Academy of Dermatology*, **52**, 937–958. <https://doi.org/10.1016/j.jaad.2004.07.063>
- Kütting, B. & Drexler, H., 2010. UV-induced skin cancer at workplace and evidence-based prevention. *International archives of occupational and environmental health*, **83**, 843–854. <https://doi.org/10.1007/s00420-010-0532-4>
- Lima, D. & Pozzobon, J., 2005. Amazônia socioambiental: sustentabilidade ecológica e diversidade social. *Estudos avançados*, **19**, 45–76. <https://doi.org/10.1590/S0103-40142005000200004>
- Lima, R. T. d. S. et al., 2016. A Atenção Básica no Brasil e o Programa Mais Médicos: uma análise de indicadores de produção. *Ciência & Saúde Coletiva*, **21**, 2685-2696. <https://doi.org/10.1590/1413-81232015219.15412016>
- Limberger, L. & Silva, M. E. S., 2016. Precipitação na bacia amazônica e sua associação à variabilidade da temperatura da superfície dos oceanos Pacífico e Atlântico: uma revisão. *GEOUSP Espaço e Tempo (Online)*, **20**, 657–675. <https://doi.org/10.11606/issn.2179-0892.geousp.2016.105393>
- Mahmoud, B. H. et al., 2010. Impact of long-wavelength UVA and visible light on melanocompetent skin. *Journal of investigative dermatology*, **130**, 2092–2097. <https://doi.org/10.1038/jid.2010.95>
- Marehbian, J. et al., 2007. Occupation and keratinocyte cancer risk: a population-based case–control study. *Cancer Causes & Control*, **18**, 895–908. <https://doi.org/10.1007/s10552-007-9034-4>
- Marionnet, C. et al., 2017. UVA1-induced skin darkening is associated with molecular changes even in highly pigmented skin individuals. *Journal of Investigative Dermatology*, **137**, 1184–1187. <https://doi.org/10.1016/j.jid.2016.12.016>
- Martins, P. A. S. et al., 2023. Updating of the Köppen and Thornthwaite and Mather (1955) climate classification system for the Southern Amazonas. *Revista do Departamento de Geografia*, **43**, e191137. <http://dx.doi.org/10.11606/eISSN.2236-2878.rdg.2023.191137>
- McC Campbell, L. et al., 2024. Social vulnerabilities in head-neck melanoma care: A retrospective cohort study in the United States. *JAAD International*. **17**, 37-47. <https://doi.org/10.1016/j.jdin.2024.05.011>
- Mélo, K., Santos, A., Amorim, J., Fernandes, T. M., & Souza, C. F. (2019). Análise temporal da mortalidade por cancer de pele melanona no Brasil: 2000 a 2016. *Surgical & Cosmetic Dermatology*, **11**, 287-294. <https://doi.org/10.5935/scd1984-8773.20191141486>

- Mesquita, L. G. et al., 2020. Skin Cancer and Family Income: an Ecological Study. *Revista Brasileira de Cancerologia*, **66**, e-07949. <https://doi.org/10.32635/2176-9745.RBC.2020v66n4.949>
- Modenese, A., et al., 2018. Solar radiation exposure and outdoor work: an underestimated occupational risk. *International journal of environmental research and public health*, **15**, 2063. <https://doi.org/10.3390/ijerph15102063>
- Moyal, D. D. & Fourtanier, A. M., 2001. Broad-spectrum sunscreens provide better protection from the suppression of the elicitation phase of delayed-type hypersensitivity response in humans. *Journal of investigative dermatology*, **117**, 1186–1192. <https://doi.org/10.1046/j.0022-202x.2001.01545.x>
- Nascimento, M. I. et al., 2022. Trends in non-Melanoma Skin Cancer Mortality in Brazil and its Macroregions. *Revista Brasileira de Cancerologia*, **68**, e-022083. <https://doi.org/10.32635/2176-9745.RBC.2022v68n1.2083>
- Oliveira, M. M. F., 2013. Radiação ultravioleta/índice ultravioleta e câncer de pele no Brasil: condições ambientais e vulnerabilidades sociais. *Revista Brasileira de Climatologia*, **13**. <https://doi.org/10.5380/abclima.v13i0.36764>
- Passeron, T. et al., 2021. Photoprotection according to skin phototype and dermatoses: practical recommendations from an expert panel. *Journal of the European Academy of Dermatology and Venereology*, **35**, 1460–1469. <https://doi.org/10.1111/jdv.17242>
- Pega, F. et al., 2023. Global, regional and national burdens of non-melanoma skin cancer attributable to occupational exposure to solar ultraviolet radiation for 183 countries, 2000–2019: A systematic analysis from the WHO/ILO Joint Estimates of the Work-related Burden of Disease. *Environment International*, **181**, 108226. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.108226>
- Radespiel-Tröger, M. et al., 2009. Outdoor work and skin cancer incidence: a registry-based study in Bavaria. *International archives of occupational and environmental health*, **82**, 357–363. <https://doi.org/10.1007/s00420-008-0342-0>
- Rigel, D. S. et al., 2022. Photoprotection for all: Current gaps and opportunities. *Journal of the American Academy of Dermatology*, **86**, S18–S26. <https://doi.org/10.1016/j.jaad.2021.12.023>
- Salvio, A. G. et al., 2024. Photodynamic therapy for nodular basal cell carcinoma up to 5mm located on high-risk area: Effectiveness and long-term follow-up results. *Photodiagnosis and Photodynamic Therapy*, **45**, 103919. <https://doi.org/10.1016/j.pdpdt.2023.103919>
- Salvio, A. G. et al., 2024. Long-term follow-up results of a pilot study for nodular basal cell carcinoma with PDT using partial home treatment protocol. *Photodiagnosis and Photodynamic Therapy*, **45**, 103930. <https://doi.org/10.1016/j.pdpdt.2023.103930>
- Salvio, A. G. et al., 2022. A new photodynamic therapy protocol for nodular basal cell carcinoma treatment: Effectiveness and long-term follow-up. *Photodiagnosis and Photodynamic Therapy*, **37**, 102668. <https://doi.org/10.1016/j.pdpdt.2021.102668>

- Santos, M. O. et al., 2023. Estimativa de incidência de câncer no Brasil, 2023-2025. *Revista Brasileira de Cancerologia*, **69**, e-21370. <https://doi.org/10.32635/2176-9745.RBC.2023v69n1.3700>
- Saucedo, G. M. G., et al., 2020. Effects of solar radiation and an update on photoprotection. *Anales de Pediatría (English Edition)*, **92**, 377.e1-377.e9. <https://doi.org/10.1016/j.anpede.2020.04.003>
- SBD, 2021a. *Dezembro Laranja: Campanha de prevenção ao câncer de pele*. Sociedade Brasileira de Dermatologia. <https://sbd.org.br/campanha/dezembrolaranja/>. (Acessado em 10 de janeiro de 2024).
- SBD, 2021b. *Sob o sol com saúde e bem-estar: guia de fotoproteção da Sociedade Brasileira de Dermatologia*. <https://issuu.com/sbd.br/docs/sbd-guiafotoprotecao>. (Acessado em 10 de fevereiro de 2024).
- Seck, S., et al., 2023. Photoprotection in skin of color. *Photochem Photobiol Sci*, **22**, 441-456. <https://doi.org/10.1007/s43630-022-00314-z>
- SEPROR, 2023. *Programa Atualiza Pescador*. <https://www.sepror.am.gov.br/atualiza-pescador-governo-do-amazonas-investe-na-saude-e-seguranca-do-pescador-com-entregas-de-21-mil-kits-de-protecao-individual/>. (Acessado em 20 de fevereiro de 2025)
- Serra, N., et al., 2019. Continuity correction of Pearson's chi-square test in 2x2 Contingency Tables: A mini-review on recent development. *Epidemiology, Biostatistics, and Public Health*, **16**. <https://doi.org/10.2427/13059>
- Shetty, N., et al., 2023. The effects of UV filters on health and the environment. *Photochem Photobiol Sci*, **22**, 2463-2471. <https://doi.org/10.1007/s43630-023-00446-w>
- Silva, S. L., et al., 2020. Câncer de pele na região Norte do Brasil: levantamento das notificações de 2014-2019 pela plataforma DATASUS. *Revista Cereus*, **12**, 198-211.
- Souza, R. J. S. P. et al., 2011. Estimativa do custo do tratamento do câncer de pele tipo não-melanoma no Estado de São Paulo - Brasil. *Anais Brasileiros de Dermatologia*, **86**, 657-662. <https://doi.org/10.1590/S0365-05962011000400005>
- Souza, S. A. et al., 2022. Variabilidade da precipitação na mesorregião sul do Amazonas em decorrência de eventos de El Niño. *RAEGA—O Espaço Geográfico em Análise*, **54**, 23-36. <http://dx.doi.org/10.5380/raega.v54i0.73972>
- Suarez, L. S. F., et al., 2017. Ultraviolet solar radiation in the tropical central Andes (12.0 S). *Photochemical & Photobiological Sciences*, **16**, 954-971. <https://doi.org/10.1039/c6pp00161k>
- Sung, H. et al., 2021. Global cancer statistics 2020: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries. *CA: A cancer journal for clinicians*, **71**, 209-249. <https://doi.org/10.3322/caac.21660>
- Szklo, A. S. et al., 2007. Comportamento relativo à exposição e proteção solar na população de 15 anos ou mais de 15 capitais brasileiras e Distrito Federal, 2002-2003. *Cadernos de Saúde Pública*, **23**, 823-834. <https://doi.org/10.1590/S0102-311X2007000400010>
- Tavares, L. & Cordeiro, L., 2017. *Perfil socioeconômico e ambiental do sul do estado do Amazonas: Subsídios para Análise da Paisagem*. WWF-Brasil.

- WCRFI, 2022. *World Cancer Research Fund (Last updated March 2022)*. <https://www.wcrf.org/preventing-cancer/cancer-types/skin-cancer/>. (Acessado em 23 de fevereiro de 2025).
- Young, A. R., et al., 2017. Ultraviolet radiation and the skin: Photobiology and sunscreen photoprotection. *Journal of the American Academy of Dermatology*, **76**, S100–S109. <https://doi.org/10.1016/j.jaad.2016.09.038>
- Zanoni, R. D. et al., 2023. Estudo epidemiológico descritivo do melanoma no Brasil e suas macrorregiões nos últimos 5 anos. *Brazilian Journal of Implantology and Health Sciences*, **5**, 1331-1341. <https://doi.org/10.36557/2674-8169.2023v5n4p1331-1341>

Capítulo 5

5 VARIABILIDADE DA RADIAÇÃO E SUSCETIBILIDADE AOS RISCOS ASSOCIADOS AO UV

A exposição à radiação ultravioleta (UV) é amplamente reconhecida como o principal fator ambiental de risco para o desenvolvimento do câncer de pele, especialmente em regiões tropicais, onde os níveis de irradiância solar permanecem elevados ao longo de grande parte do ano. A análise dos hábitos de exposição solar e das barreiras socioeconômicas à fotoproteção, discutida no capítulo anterior, revela que a população da Região Geográfica Imediata de Manicoré está inserida em um contexto de vulnerabilidade que favorece a ocorrência de efeitos crônicos associados à exposição UV, entre os quais se destacam os diferentes tipos de câncer de pele.

Nesse contexto, torna-se fundamental compreender a dinâmica das irradiâncias UV — expressas por meio do Índice Ultravioleta (UVI), da Dose Eritemal Diária (EDD) e da Taxa de Dose Eritemal ao meio-dia solar local (EDR) —, bem como os fatores atmosféricos que as modulam, como o ozônio, os aerossóis, o vapor d'água e a cobertura de nuvens. A caracterização do ciclo anual e das tendências temporais dessas variáveis possibilita a identificação de períodos de maior risco potencial e contribui para embasar políticas públicas e estratégias preventivas mais eficazes.

Este capítulo também apresenta o desenvolvimento de um índice de suscetibilidade individual aos efeitos deletérios da radiação UV, construído a partir de informações relacionadas ao fototipo cutâneo segundo a escala de Fitzpatrick, hábitos de exposição solar e fotoproteção, além de aspectos socioeconômicos como renda familiar bruta, escolaridade, acesso a serviços de saúde (básica e especializada), densidade domiciliar e condição de posse do domicílio. Ressalta-se que esses dados estavam disponíveis apenas para os municípios de Manicoré, Novo Aripuanã e Apuí, o que justificou a concentração das análises nessas três localidades. Essa delimitação é coerente com o propósito central desta pesquisa, que busca estabelecer uma ponte entre as variáveis ambientais e o grau de suscetibilidade da população aos efeitos nocivos da radiação UV.

5.1 Materiais e Métodos

5.1.1 Descrição da área de estudo

O estudo foi realizado em uma área da Amazônia brasileira, mais especificamente na microrregião do Madeira, situada no sul do estado do Amazonas, e compreende os municípios de Manicoré (48,3 mil km²), Novo Aripuanã (41,2 mil km²) e Apuí (54,2 mil km²) (Figura 5-1). Essa região cobre uma área total de 144 mil km² e abriga aproximadamente 98.379 habitantes, distribuídos entre Manicoré (53.914 habitantes), Novo Aripuanã (23.818 habitantes) e Apuí (20.647 habitantes) (IBGE, 2022). Além de sua extensa cobertura florestal, essa microrregião apresenta um regime climático fortemente influenciado pela dinâmica atmosférica da Amazônia.

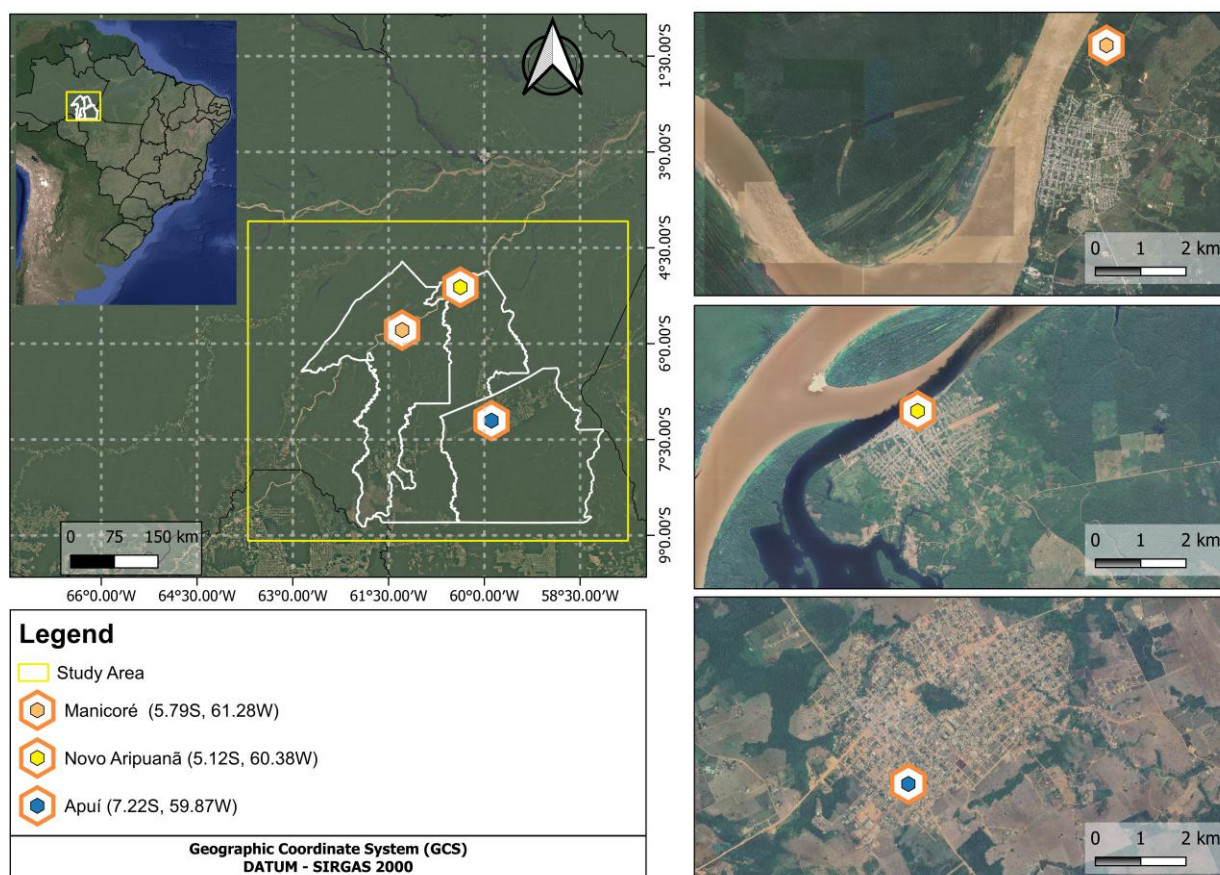


Figura 5-1 - Localização da área de estudo na microrregião do Madeira, sul do Amazonas, Brasil. O mapa principal apresenta os municípios analisados (Manicoré, Novo Aripuanã e Apuí), com a delimitação municipal destacada em branco. A miniatura no canto superior esquerdo mostra a localização da região dentro do Brasil. À direita, imagens de alta resolução detalham os pontos de coleta nos respectivos municípios, evidenciando a distribuição espacial das áreas urbanas e sua relação com os corpos hídricos.

Segundo a classificação climática de Köppen, a região é predominantemente caracterizada pelo clima de monção tropical (Am), com três períodos distintos ao longo do ano: chuvoso, seco e de transição. Durante a estação chuvosa (outubro a abril), a convergência de umidade sobre a Amazônia, associada à atuação de sistemas meteorológicos como a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), resulta em elevados índices pluviométricos, com precipitação anual superior a 1.500 mm. Nos meses de junho a agosto, correspondentes ao período seco, a precipitação diminui significativamente devido à menor atividade convectiva e à influência do anticiclone subtropical do Atlântico Sul, resultando em valores médios abaixo de 60 mm. Já nos meses de maio e setembro, período caracterizado por mudanças graduais nas condições atmosféricas, ocorrem as transições sazonais, passagem entre a estação chuvosa e a seca, e entre a seca e a chuvosa, respectivamente (França & Mendonça, 2016; Limberger & Silva, 2016; Martins et al., 2023).

A temperatura média anual na região varia entre 25 e 27 °C, enquanto a umidade relativa do ar oscila entre 85% e 90%, podendo atingir valores inferiores a 50% durante o período seco. Essas condições climáticas influenciam diretamente a dinâmica atmosférica local, afetando processos ecológicos e a exposição da população à radiação ultravioleta (Martins et al., 2023).

5.1.2 Instrumentos, coleta e tratamento dos dados

Dada a inexistência de estações de monitoramento atmosférico *in situ* na área de estudo, a presente investigação recorreu ao uso de dados obtidos por sensoriamento remoto, fornecendo uma alternativa robusta para análise de variáveis ambientais em regiões remotas. Especificamente, foram utilizados produtos derivados do instrumento *Ozone Monitoring Instrument* (OMI), a bordo do satélite Aura/NASA, e do *Copernicus Atmosphere Monitoring Service* (CAMS).

Enquanto o OMI realiza medições espectrais por sensoriamento remoto, o CAMS fornece estimativas geradas a partir de modelos atmosféricos globais, com assimilação de dados observacionais (Levelt et al., 2006; Tanskanen et al., 2006). Ambos os sistemas são amplamente utilizados em estudos climáticos e ambientais e permitem a obtenção de estimativas contínuas, especialmente consistentes de parâmetros atmosféricos relevantes para o controle da radiação UV — cuja aquisição por métodos convencionais seria inviável na região analisada. O Quadro 5-1, a seguir, apresenta as variáveis atmosféricas consideradas, suas respectivas fontes e unidades.

Variáveis	Nomenclatura	Unidades	Sistema
Espessura Óptica das Nuvens	COT	--	OMI
Coluna Total de Ozônio	TOC	DU	CAMS e OMI
Coluna Total de Vapor d'Água	TCWV	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$	CAMS
Material Particulado com diâmetro inferior a 2,5 μm	PM _{2.5}	$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	CAMS
Material Particulado com diâmetro inferior a 10 μm	PM ₁₀	$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	CAMS
Profundidade Óptica Total de Aerossóis a 550 nm	TAOD550	--	CAMS
Índice Ultravioleta	UVI	--	OMI
Taxa de Dose Eritêmica	EDR	$\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$	OMI
Dose Eritêmica Diária	EDD	$\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$	OMI

Quadro 5-1 - Variáveis utilizadas nesta pesquisa com resolução temporal diária compreendida entre 2005 e 2022 e resolução espacial de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ (após a interpolação bilinear).

O acesso e o processamento inicial dos dados foram realizados por meio da ferramenta *Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center* da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), permitindo a seleção geoespacial da área de estudo, o intervalo temporal (1 de janeiro de 2005 a 31 de dezembro de 2022) e as variáveis de interesse (Hovila et al., 2013). Os arquivos foram obtidos no formato NetCDF e submetidos a uma reamostragem para uma grade de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ utilizando Interpolação Bilinear (Schlzweida, 2024).

Os dados de PM_{2.5}, PM₁₀ e AOD¹ foram obtidos a partir do *Copernicus Atmosphere Monitoring Service* (CAMS), um sistema coordenado pelo *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), que fornece estimativas contínuas da composição atmosférica global. O CAMS combina modelagem numérica com dados de satélite e medições de superfície para gerar previsões diárias da qualidade do ar em escala global. Esses produtos são derivados da assimilação de dados observacionais em modelos atmosféricos, permitindo estimar a concentração de aerossóis e material particulado, variáveis essenciais para caracterizar a interação entre a atmosfera e a radiação solar (Inness et al., 2019; Ceccato et al., 2021).

O processo de extração desses dados seguiu metodologia semelhante à aplicada aos produtos do OMI, envolvendo a mesma resolução espacial, seleção da área e do período de estudo, filtragem das variáveis de interesse e download após processamento no servidor do CAMS. Apenas a variável TOC foi obtida simultaneamente nas duas plataformas. Para avaliar a consistência entre esses produtos da TOC, foi realizada uma comparação entre os dados de TOC provenientes do OMI e do CAMS, revelando um coeficiente de determinação (R^2) de 0,94, o que indica alta concordância entre os dois conjuntos. Apesar da forte correlação, optou-se pelo uso exclusivo dos dados do OMI

¹ O termo AOD empregado neste texto refere-se a Total Aerosol Optical Depth at 550 nm.

neste capítulo, por sua maior aderência ao comportamento observado do ozônio total na região de estudo, em função de sua origem exclusivamente observacional e de sua alta resolução espectral.

A obtenção e organização dos dados foram automatizadas por meio de *scripts Shell* no ambiente Linux, facilitando o gerenciamento de grandes volumes de informações. Como os dados foram originalmente disponibilizados em frequência diária, as séries foram agregadas em médias mensais para cada ponto indicado na Figura 5-1. Em seguida, já utilizando a linguagem de programação Python, foram calculadas as médias mensais espaciais entre os três pontos coordenados.

5.1.3 *Análise exploratória e estatística*

5.1.3.1 *Análise exploratória das variabilidades mensal interanual e sazonal*

A variabilidade mensal interanual e o ciclo anual das variáveis atmosféricas foram analisados utilizando diagramas de violino, que combinam a distribuição estatística dos dados com *boxplots*, permitindo visualizar a dispersão e densidade dos valores ao longo dos meses do ano. Os diagramas de violino são particularmente úteis para avaliar a variabilidade sazonal e a assimetria na distribuição das variáveis.

5.1.3.2 *Análise de tendências das variáveis atmosféricas e de radiação UV*

A análise de tendências de longo prazo das variáveis atmosféricas e relacionadas à radiação ultravioleta foi conduzida com base em séries temporais no período de 2005 a 2022, com o objetivo de identificar tendências monotônicas (crescente ou decrescente) e quantificar a taxa anual de variação. As séries anuais foram derivadas a partir das médias mensais previamente calculadas entre os três pontos analisados, conforme descrito na etapa de processamento. Essa abordagem permitiu reduzir a variabilidade de curto prazo e representar de forma mais robusta o comportamento médio da região ao longo do tempo.

Para essa finalidade, foram empregados dois métodos estatísticos não paramétricos: o teste de Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1948) e a regressão de Theil-Sen (Sen, 1968). A opção por métodos não paramétricos justifica-se pelo fato de que eles não exigem pressupostos de normalidade dos dados, sendo mais robustos frente a distribuições assimétricas, dados com valores extremos (*outliers*) — característica frequentemente observada em dados ambientais.

O teste de Mann-Kendall foi utilizado para verificar a significância estatística da tendência presente na série. Trata-se de um teste que avalia se há uma tendência monotônica (seja ela

crescente ou decrescente) ao longo do tempo, sem assumir nenhuma forma funcional específica (como linearidade). O teste calcula o coeficiente de Kendall (τ), cujo sinal indica a direção da tendência (positivo para crescente e negativo para decrescente), e cuja magnitude reflete a força dessa tendência. O nível de significância adotado foi $p < 0,05$, sendo as tendências consideradas estatisticamente significativas quando esse critério é atendido.

A regressão de Theil-Sen, por sua vez, foi aplicada para quantificar a taxa de variação ao longo do tempo. Esse estimador consiste na mediana de todas as inclinações possíveis entre pares de pontos da série temporal, o que o torna menos sensível a outliers do que a regressão linear comum (método dos mínimos quadrados). A inclinação resultante representa a variação média anual da variável em análise. Ao empregar a mediana das inclinações, esse método assegura maior estabilidade estatística, especialmente em séries curtas ou ruidosas, como frequentemente ocorre em estudos ambientais.

A combinação desses dois métodos permite identificar não apenas a existência de tendências significativas, mas também sua magnitude, com maior confiabilidade estatística, atendendo às exigências metodológicas para a análise de séries temporais ambientais.

5.1.3.3 *Análise da influência das variáveis atmosféricas na variabilidade do índice UV*

O framework SHAP (*Shapley Additive exPlanations*) foi aplicado com o objetivo de interpretar a contribuição marginal de cada variável atmosférica na variabilidade do Índice Ultravioleta (UVI). Especificamente, utilizou-se o algoritmo TreeExplainer para calcular os valores SHAP a partir do modelo Random Forest previamente treinado (Lundberg & Lee, 2017; Lundberg et al., 2020). Os valores SHAP quantificam o impacto individual de cada variável preditora na saída do modelo (UVI), considerando cada instância do conjunto de dados.

Inicialmente, as variáveis preditoras COT, TOC, TCWV, PM_{2.5}, PM₁₀ AOD foram divididas em subconjuntos de treinamento (70%) e teste (30%) utilizando o método `train_test_split`, garantindo uma distribuição aleatória dos dados (Géron, 2019). Para evitar impactos devido a escalas distintas entre as variáveis, foi aplicado a normalização por padronização (`StandardScaler`), assegurando que todas as variáveis preditoras apresentassem média zero e desvio padrão unitário (Kuhn & Johnson, 2013).

A modelagem foi conduzida por meio do Random Forest Regressor (RFR), um algoritmo baseado em múltiplas árvores de decisão, reconhecido por sua robustez e capacidade de reduzir a variância das previsões (Breiman, 2001). O modelo foi treinado com 100 árvores

(n_estimators=100) e hiperparâmetros padrão, utilizando um valor fixo de random_state=42 para garantir a reprodutibilidade dos resultados (Géron, 2019).

Para facilitar a interpretação dos resultados, foi elaborado um painel de diagramas de dispersão combinados com curvas de densidade (KDE), apresentando a relação entre os valores observados de cada variável preditora e seus respectivos valores SHAP. As variáveis foram organizadas no painel de acordo com a ordem decrescente do valor médio absoluto dos valores SHAP, evidenciando os fatores com maior influência na previsão do UVI.

Essa abordagem gráfica permite uma visualização detalhada tanto da distribuição quanto da direção do impacto de cada variável, além de revelar possíveis relações não lineares, oferecendo uma interpretação mais abrangente em comparação com os gráficos resumo tradicionais.

5.1.4 Desenvolvimento do índice de suscetibilidade aos riscos associados ao UV

5.1.4.1 Seleção e codificação de variáveis em scores discretos

Inicialmente foram selecionadas oito variáveis classificatórias com potencial influência sobre a exposição individual à radiação UV, abrangendo aspectos biológicos, comportamentais e socioeconômicos (Quadro 5-2).

Nomenclatura	Variável	Itens
V1	Fototipo	I, II, III, IV, V, VI
V2	Tempo de exposição	Até 15 minutos, entre 15 e 30 minutos, por mais de 30 minutos
V3	Práticas de fotoproteção	Sem proteção, Uso de FPS*, Outros**, Ambos***
V4	Renda bruta familiar	< 1 SM; = 1 SM; $1 < SM \leq 1,5$; $1,5 < SM \leq 3$; $3 < SM \leq 5$; > 5 SM, onde SM significa Salário-mínimo.
V5	Escolaridade	Analfabeto, Fundamental, Magistério, Médio, Médio + Técnico, Superior, Especialização, Mestrado, Doutorado, Pós-doutorado
V6	Condição de posse do domicílio	Alugado, Emprestado, Próprio
V7	Densidade familiar	1; De 2 a 4; De 5 a 7; De 8 a 10; Mais de 10
V8	Acesso à saúde	SUS, Particular sem convênio, Particular com convênio, SUS + Particular sem convênio, SUS + Particular com convênio

Quadro 5-2 - Variáveis descritoras de aspectos biológicos, comportamentais e socioeconômico. Fonte. SEMSA (Manicoré, Novo Aripuanã e Apuí). *Filtro de proteção solar; **Uso de camisa, chapéu, óculos escuros, etc.; *** Uso de camisa, chapéu, óculos escuros, associado ainda ao uso de FPS.

Em seguida, todas as oito variáveis foram categorizadas e codificadas em escores variando de 1 a 3, em que 1 representa menor risco e 3 representa maior risco, relacionado ao seu respectivo aspecto, seja ele biológico, comportamental e/ou socioeconômico (Quadro 5-3).

Score	V1	V2 (minutos)	V3	V4 (SM)	V5 (Nível)	V6	V7 (pessoas)	V8
1	V, VI	≤ 15	FPS+Outros	> 3	≥ 3°	Próprio	De 1 a 4	Particular com ou sem convênio
2	III, IV	> 15, ≤ 30	Outros ou FPS	≥ 1, ≤ 3	≤ 2°	Emprestado	De 5 a 7	SUS + Particular com ou sem convênio
3	I, II	> 30	Sem proteção	< 1	≤ 1°	Alugado	Mais de 7	SUS

Quadro 5-3 - Variáveis descritoras de aspectos biológicos, comportamentais e socioeconômicos codificadas em escores de 1 a 3.

5.1.4.2 Padronização das variáveis via z-score

Todas as variáveis selecionadas foram padronizadas utilizando o método de z-score (Eq. 5.1), de modo que apresentassem média zero e desvio padrão igual a um.

$$z_{ij} = \frac{x_{ij} - \mu_j}{\sigma_j}, \quad 5.1$$

em que z_{ij} é o z-score padronizado do indivíduo i na variável j ; x_{ij} representa o valor observado da variável j para o indivíduo i ; μ_j é a média da variável j ; e σ_j é o desvio-padrão da variável j . Essa escolha foi motivada pela necessidade de equalizar a escala das variáveis e eliminar a influência de unidades arbitrárias, assegurando que todas contribuíssem de forma comparável na construção do índice contínuo de suscetibilidade.

A abordagem por z-score permite representar cada valor individual em relação à distribuição da própria variável, indicando o número de desvios-padrão acima ou abaixo da média. Essa técnica é amplamente empregada em modelos estatísticos multivariados e na construção de índices compostos, principalmente quando as variáveis possuem naturezas distintas ou ordens de magnitude diferentes (OECD, 2008; Abdi, 2007).

Além disso, a utilização de escores padronizados supera limitações da abordagem baseada em pontuação fixa (como 1, 2 ou 3), que, apesar de simples e intuitiva, impõe pesos arbitrários e não reflete a dispersão real dos dados. O uso do z-score evita distorções na agregação dos escores

individuais, garantindo uma medida mais precisa, contínua e sensível à variabilidade observada na amostra.

Embora testes preliminares tenham indicado que as variáveis selecionadas não apresentam distribuição normal (teste de Shapiro-Wilk, $p < 0,05$), ressalta-se que a ausência de normalidade não compromete as análises conduzidas neste estudo. Isso ocorre porque o objetivo central das análises não envolve inferências paramétricas sobre distribuições futuras nem estimativas probabilísticas diretas, mas sim a construção de um índice descritivo e comparativo baseado em medidas padronizadas e robustas de posição central. Dessa forma, a utilização dos z-scores permanece plenamente adequada, sendo coerente com recomendações técnicas internacionais sobre a construção de índices compostos (OECD, 2008).

5.1.4.3 Cálculo do índice de suscetibilidade

O Índice de Suscetibilidade (IS) foi calculado por indivíduo com base na mediana dos z-scores padronizados das oito variáveis selecionadas. A opção pela mediana, em detrimento da média ou da soma dos escores, fundamenta-se em critérios estatísticos e conceituais relacionados à robustez da medida central e à natureza dos dados analisados.

A mediana é uma medida de tendência central menos sensível à presença de valores extremos, o que a torna particularmente apropriada para dados assimétricos ou com outliers — características frequentemente observadas em variáveis socioeconômicas e comportamentais (Leys et al., 2013; Hox, et al., 2017). Em contrapartida, o uso da média pode resultar em distorções relevantes quando uma ou mais variáveis apresentam alta variabilidade, influenciando indevidamente o valor final do índice.

Além disso, a mediana reflete a posição central da distribuição individual padronizada, assegurando que o índice represente de forma mais fiel a condição típica de suscetibilidade de cada indivíduo, sem que valores atípicos ou desvios extremos comprometam sua representatividade. A soma dos z-scores, por sua vez, implicaria na agregação direta de variações positivas e negativas, o que poderia neutralizar efeitos relevantes e dificultar a interpretação do indicador como medida contínua de risco relativo.

Portanto, a escolha da mediana dos z-scores busca garantir equilíbrio entre estabilidade estatística e sensibilidade às condições individuais, mantendo a coerência metodológica na construção de um índice composto contínuo, comparável e interpretável (OECD, 2008).

5.1.4.4 Classificação do índice de suscetibilidade

Após o cálculo do Índice de Suscetibilidade (IS) com base na mediana dos z-scores padronizados, os valores foram classificados em quatro faixas ordenadas de suscetibilidade: baixa ($IS < -0,5$), moderada ($-0,5 \leq IS \leq 0$), alta ($0 < IS \leq 0,5$) e extrema ($IS > 0,5$).

A adoção desses pontos de corte seguiu critérios de simetria estatística e interpretabilidade prática, com base na própria distribuição padronizada dos escores (z-scores). Em escalas normalizadas, os valores entre $-0,5$ e $0,5$ situam-se próximos à média populacional, sendo considerados como uma faixa de variação típica. Já valores abaixo de $-0,5$ ou acima de $0,5$ indicam desvios mais acentuados da média, permitindo distinguir grupos com características significativamente diferentes em relação à suscetibilidade.

O uso de quartis centrados ou intervalos baseados em desvios-padrão é comum na literatura para segmentar índices contínuos derivados de escores padronizados, especialmente quando se busca construir faixas com significado ordinal e potencial explicativo (OECD, 2008; Decancq & Lugo, 2013). Nesse contexto, a inclusão de uma categoria superior — “suscetibilidade extrema” — visa destacar o subconjunto de indivíduos que reúne condições adversas mais acentuadas, com potencial maior de risco acumulado à exposição solar.

5.1.4.5 Contribuição percentual das variáveis no índice de suscetibilidade

Para quantificar e avaliar a contribuição relativa de cada variável dentro dos quatro níveis de classificações do Índice de Suscetibilidade (Baixa, Moderada, Alta e Extrema), foram calculadas as médias dos valores absolutos dos z-scores de cada variável por classe de suscetibilidade. Em seguida, esses valores médios foram convertidos em percentuais relativos, refletindo a importância proporcional de cada variável na composição final do índice dentro de cada faixa estabelecida (Abdi, 2007; Han et al., 2008).

Especificamente, para cada classe de suscetibilidade, a média absoluta do z-score foi obtida individualmente por variável, utilizando a Equação (5.2):

$$\mu_j^c = \frac{1}{n_c} \sum_{i=1}^{n_c} |z_{ij}|, \quad (5.2)$$

em que μ_j^c é a média da variável j na classe c ; n_c representa o número de indivíduos na classe c ; e $|z_{ij}|$ é o valor absoluto do z-score do indivíduo i na variável j .

Posteriormente, o peso percentual relativo de cada variável foi obtido pela divisão da média absoluta de cada variável pela soma total das médias absolutas de todas as variáveis dentro da classe, multiplicado por 100, conforme a Equação (5.3):

$$\rho_j^c = \frac{\mu_j^c}{\sum_{j=1}^m \mu_j^c} \times 100, \quad (5.3)$$

onde ρ_j^c é o peso percentual da variável j na classe c ; μ_j^c é a média absoluta do z-score da variável j na classe c ; e m é o número total de variáveis consideradas no *IS*.

Dessa forma, cada variável possui uma contribuição percentual específica dentro de cada faixa do índice, permitindo a interpretação direta e transparente sobre quais aspectos (biológicos, socioeconômicos ou comportamentais) são predominantes ou menos expressivos em diferentes níveis de suscetibilidade.

5.1.4.6 Estimativa da dose de UV por indivíduo

A estimativa da dose individual de radiação ultravioleta (dose UV estimada) foi realizada com base na combinação do tempo médio diário ($\bar{\tau}$) de exposição solar, por categoria autorreferida, e na Dose Eritêmica Instantânea Média (EDR) da região de estudo.

Foi estabelecido um $\bar{\tau}$ para cada intervalo de tempo de exposição, isto é, até 15 minutos foi atribuído $\bar{\tau} = 10$ minutos (600 s); entre 15 e 30 minutos, $\bar{\tau} = 25$ minutos (1500 s), e acima de 30 minutos $\bar{\tau} = 45$ minutos (2700 s).

A intensidade da radiação foi definida pela EDR média da região no intervalo de 11h40 a 12h (fuso horário de Manaus), estimada com base em dados satelitais (OMI/Aura) no período de 2005 a 2022, resultando em um valor médio de $\overline{EDR} = 242,24 \text{ mW/m}^2$. Para fins de cálculo da dose acumulada, esse valor foi convertido para mW/cm^2 ($1 \text{ mW/m}^2 = 0,0001 \text{ mW/cm}^2$), resultando em uma irradiância média de $0,024224 \text{ mW/cm}^2$.

A dose de UV estimada ($DOSE_{UV}$; mJ/cm^2) para cada indivíduo foi então calculada pela Equação (5.4)

$$DOSE_{UV} = \overline{EDR} \cdot \bar{\tau}. \quad (5.4)$$

Essa métrica representa uma aproximação da carga de radiação efetivamente recebida, considerando simultaneamente aspectos comportamentais (tempo de exposição) e ambientais (nível médio de radiação disponível).

5.1.4.7 Dose mínima eritemal e análise de riscos por exposição

A Dose Mínima Eritemal (MED) foi definida com base no fototipo cutâneo autorreferido, segundo os critérios da classificação de Fitzpatrick. Essa dose representa a quantidade mínima de radiação UV necessária para causar eritema (vermelhidão) visível na pele, variando de acordo com a sensibilidade individual à radiação solar (Fitzpatrick, 1988).

Considerando a recodificação prévia dos fototipos para composição do índice de suscetibilidade, foi atribuída uma MED representativa para cada grupo de escore, conforme valores de referência encontrados na literatura dermatológica (Diffey, 1991):

Score 1 (fototipos V e VI): 60 mJ/cm²,

Score 2 (fototipos III e IV): 30 mJ/cm²,

Score 3 (fototipos I e II): 20 mJ/cm².

Com base nessa atribuição, foi possível calcular, para cada indivíduo, se a dose UV estimada ultrapassava ou não o valor da MED correspondente ao seu grupo fototípico. Essa comparação permitiu classificar os participantes como “acima da MED” ou “abaixo da MED”, refletindo o potencial de dano biológico associado à exposição relatada.

Essa variável binária (ultrapassou_MED) foi posteriormente utilizada para descrever a distribuição de risco dentro das diferentes faixas de suscetibilidade e para verificar a coerência entre o índice proposto e a exposição efetiva à radiação solar, agregando evidência empírica à validade do modelo.

5.1.4.8 Análise estatística: Kruskal-Wallis e teste de Dunn

Com o objetivo de verificar se a dose UV estimada diferia significativamente entre as faixas de suscetibilidade estabelecidas pelo IS, foi aplicado o teste de Kruskal-Wallis, uma técnica não paramétrica recomendada para comparar três ou mais grupos independentes quando os pressupostos de normalidade não são atendidos (Kruskal & Wallis, 1952). O teste avalia a hipótese nula de que as distribuições da variável de interesse (neste caso, a dose UV estimada) são equivalentes entre os grupos.

A escolha desse teste foi justificada pelo comportamento assimétrico e não normal da variável expressa pela Eq. (5.4), conforme verificado em análises preliminares. O nível de significância adotado foi de 5% ($\alpha = 0,05$).

Em caso de resultado significativo, procedeu-se à realização do teste de Dunn com correção de Holm para comparações múltiplas entre pares de faixas de suscetibilidade (Dunn, 1964;

Holm, 1979). Essa abordagem pós-hoc permite identificar quais pares de grupos apresentam diferenças estatisticamente significativas, controlando o erro tipo I associado a testes múltiplos.

Além dos testes inferenciais, foram também calculadas as medianas da dose UV estimada para cada faixa de suscetibilidade, com o objetivo de auxiliar na interpretação dos resultados e reforçar a evidência empírica das diferenças observadas.

5.2 Resultados

5.2.1 *Variações mensais interanuais e ciclo anual*

As concentrações de materiais particulados $PM_{2.5}$ e PM_{10} mantiveram-se relativamente baixas nos primeiros meses do ano, com medianas estáveis e baixa dispersão mensal. No entanto, a partir de julho, observou-se um aumento expressivo nas concentrações, com picos em agosto, associado a uma ampla dispersão mensal (Figura 5-2a, b). A Profundidade Óptica dos Aerossóis (AOD) apresentou um comportamento semelhante, com os menores registros nos meses chuvosos e um aumento progressivo a partir de agosto, atingindo seu máximo em agosto e setembro. Esses resultados indicam um padrão sazonal bem definido, com concentrações reduzidas durante os meses mais úmidos e aumentos expressivos durante a estação seca (Figura 5-2c).

A Coluna Total de vapor d'água (TCWV) é mais intensa entre janeiro e abril, com mais de 75% das observações superando 55kg/m^2 . A partir de maio, ocorre uma redução progressiva, onde entre junho e setembro (período seco) a TCWV é menos acentuada, sendo que mais de 75% das observações ficam abaixo de 46kg/m^2 (Figura 5-2d). A Espessura Óptica das Nuvens (COT) segue um comportamento semelhante ao da TCWV, nos meses úmidos, cerca de 75% das observações superam 7 unidades, enquanto durante o período seco, mais de 75% das observações estão abaixo de 7 unidades (Figura 5-2e). A Coluna Total de Ozônio (TOC) exibe um comportamento distinto das demais variáveis analisadas. De fato, nos primeiros seis meses do ano, a TOC é menos acentuada, com valores medianos variando entre 248 e 252 DU. A partir desse período, observa-se um aumento gradual, em que os máximos (~ 286 DU) são registrados entre setembro e outubro e as medianas oscilam entre 270 e 272 DU (Figura 5-2f).

As variáveis Dose Eritemal Diária (EDD), Taxa de Dose Eritemal (EDR) e Índice UV (UVI) são mais acentuadas entre janeiro e abril, menos intensas entre junho e agosto, seguidos por um aumento progressivo entre outubro e dezembro (Figura 5-2(g)-(i)).

Dado que as três variáveis de UV possuem padrões sazonais similares, diferenciando-se apenas por fatores de conversão, a análise subsequente será centrada no UVI, por se tratar de um índice amplamente utilizado na comunicação de riscos da radiação UV. Ao longo do ano, os níveis de exposição ao UV variam entre muito alto (8-10) e extremo (≥ 11), indicando períodos de maior risco. Os meses de janeiro a abril representam a fase mais crítica para a exposição ao UV, enquanto entre maio e outubro, os níveis tendem a ser relativamente menos intensos.

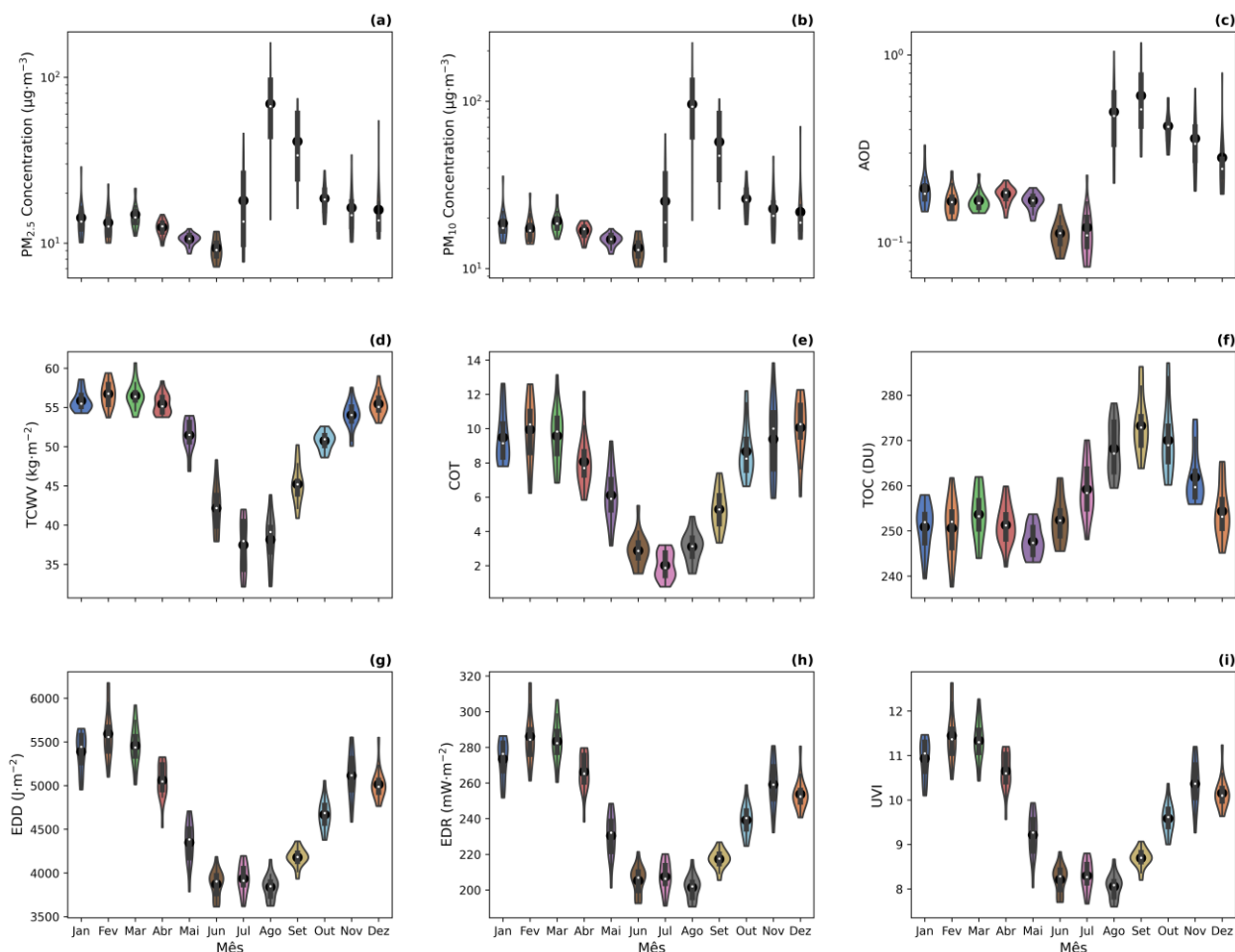


Figura 5-2 - Variabilidade mensal interanual (2005 a 2022) e ciclo anual, onde de (a) até (c) estão as concentrações de $PM_{2.5}$, PM_{10} e AOD, representadas em escala logarítmica para melhor visualização dos resultados; de (d) a (f), respectivamente, a coluna total de vapor de água, espessura óptica das nuvens e a coluna total de ozônio; e em (g), (h) e (i) a Dose Eritemal Diária, Taxa de Dose Eritemal e o Índice UV.

5.2.2 Tendências Anuais

A análise das tendências temporais dos materiais particulados ($PM_{2.5}$, PM_{10}) e AOD ao longo do período estudado revela padrões distintos entre as variáveis (Figura 5-3a-c). Os resultados indicam um aumento não significativo nas concentrações médias anuais de $PM_{2.5}$ e PM_{10} , com

taxas de crescimento de $0,29 \mu\text{g}/\text{m}^3$ por ano (Figura 5-3a) e $0,41 \mu\text{g}/\text{m}^3$ por ano (Figura 5-3b), respectivamente. Até 2018, o padrão de oscilação anual dos PMs está alinhado com os ciclos sazonais naturais, influenciados pelas variações climáticas e atividades humanas previsíveis, como queimadas e ciclos agrícolas. A partir de 2018, o aumento observado pode estar relacionado a uma combinação de fatores, incluindo aumento nas emissões por queimadas e desmatamento, possíveis mudanças climáticas locais que alteraram a dispersão dos poluentes, além de mudanças em políticas ambientais e fiscalização. No entanto, para confirmar essas hipóteses, são necessários estudos complementares que integrem dados ambientais, meteorológicos e socioeconômicos.

Em contrapartida, a AOD apresentou uma tendência decrescente, embora estatisticamente não significativa, com uma taxa de variação praticamente nula ao longo do período. Esse comportamento sugere que, apesar do aumento das concentrações de aerossóis ($\text{PM}_{2.5}$ e PM_{10}), a carga óptica total desses materiais particulados na atmosfera manteve-se relativamente estável.

A análise das tendências anuais das variáveis atmosféricas TCWV, COT e TOC ao longo do período estudado revelou padrões distintos de variação. A TCWV apresentou uma tendência decrescente não significativa, com uma taxa de variação de $-0,04 \text{ kg}/\text{m}^2$ por ano (Figura 5-3d). A COT também apresentou uma tendência decrescente, porém estatisticamente significativa ($p < 0,05$), com uma taxa de variação de $-0,06$ por ano (Figura 5-3e). Por outro lado, a TOC apresentou uma tendência crescente e significativa ($p < 0,05$), com uma taxa de $0,32 \text{ DU}$ por ano (Figura 5-3f).

A análise das tendências anuais das variáveis associadas à radiação ultravioleta (EDD, EDR e UVI) indica uma redução ao longo do período estudado, embora nenhuma das tendências tenha sido estatisticamente significativa. A EDD apresentou uma tendência decrescente não significativa, com uma taxa de variação de $-2,18 \text{ J}/\text{m}^2$ por ano (Figura 5-3g). A EDR, uma taxa de variação de $-0,15 \text{ mW}/\text{m}^2$ por ano (Figura 5-3h). Por fim, o UVI apresentou uma taxa de $-0,01$ por ano (Figura 5-3i).

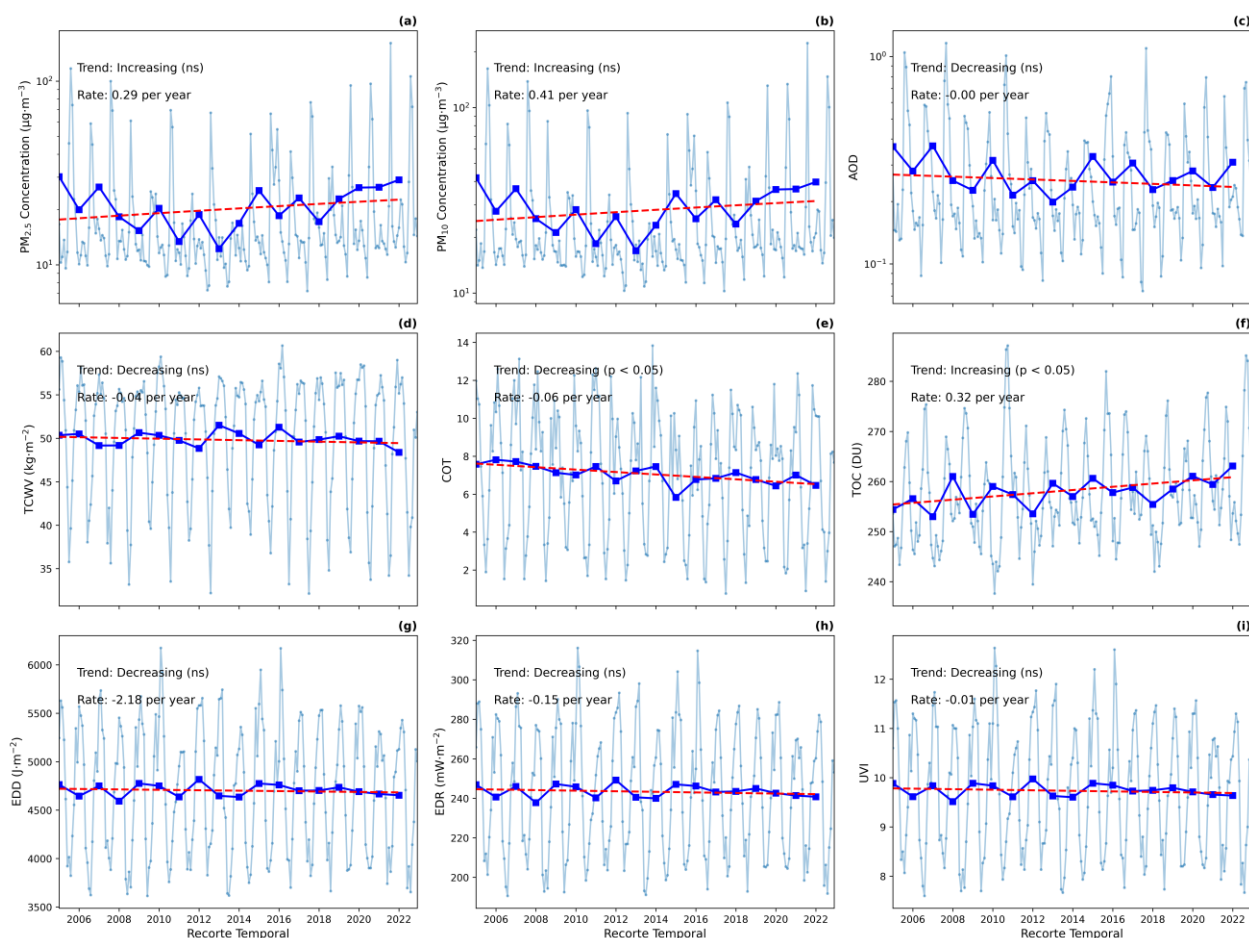


Figura 5-3 - Séries temporais das variáveis atmosféricas analisadas entre 2005 e 2022. A linha azul clara representa os valores mensais das variáveis, enquanto a linha azul escura indica a tendência suavizada ao longo do tempo. As linhas vermelhas tracejadas correspondem às tendências lineares ajustadas para cada variável. (a) Concentração de $PM_{2.5}$ ($\mu g/m^3$); (b) Concentração de PM_{10} ($\mu g/m^3$); (c) Profundidade óptica do aerossol a 550 nm (AOD_{550}). Os painéis de (a) até (c) estão representados em escala logarítmica para melhor visualização dos resultados; (d) Precipitação total na coluna (TCWV, kg/m^2); (e) Espessura óptica das nuvens (COT); (f) Coluna total de ozônio (TOC, DU); (g) Dose eritemal diária (EDD, J/m^2); (h) Taxa de dose eritemal (EDR, mW/m^2); (i) Índice UV (UVI). As taxas de variação anual e a significância estatística das tendências são apresentadas em cada painel.

5.2.3 Importância das variáveis atmosféricas na modulação do UVI

A análise dos valores SHAP revela que a TCWV apresenta a maior influência individual na predição do UVI. A relação entre TCWV e os valores SHAP é marcadamente não linear, com um aumento consistente dos valores SHAP à medida que a TCWV se eleva, indicando uma associação positiva predominante (Figura 5-4a). Esse padrão sugere que, em determinados contextos atmosféricos, o aumento do vapor d'água pode estar relacionado à maior incidência de

radiação UV, possivelmente por associações indiretas com a redução da cobertura de nuvens ou por efeitos radiativos complexos.

A AOD também se destaca como uma variável relevante, embora com impacto geralmente negativo sobre o UVI, como evidenciado pela maior densidade de pontos com valores SHAP abaixo da linha de base. Esse comportamento indica que concentrações mais elevadas de aerossóis tendem a atenuar a radiação UV por meio de processos de absorção e espalhamento, ainda que essa influência varie conforme as características físico-químicas dos aerossóis presentes.

A TOC apresenta uma relação inversa clara: valores mais elevados de TOC estão associados a efeitos SHAP negativos, refletindo seu papel de bloqueio da radiação UVB na estratosfera. Esse resultado corrobora o entendimento consolidado sobre a função protetora do ozônio na modulação da radiação ultravioleta que atinge a superfície terrestre.

A COT mostrou uma influência positiva moderada nos valores SHAP, com maior densidade de pontos positivos entre valores intermediários da variável. Isso sugere que, em certos regimes atmosféricos, nuvens mais finas ou parcialmente transparentes podem permitir a penetração parcial da radiação UV, resultando em valores de UVI mais elevados do que o esperado sob céu encoberto.

As concentrações de $PM_{2.5}$ e PM_{10} exibiram os menores valores SHAP, com distribuição densa em torno de zero, indicando impacto reduzido sobre a predição do UVI. Apesar de o material particulado poder afetar a radiação solar por processos de dispersão e absorção, seu papel específico na modulação do UVI parece ser limitado neste contexto, possivelmente devido a sua composição predominante ou às condições atmosféricas locais.

Em conjunto, os resultados apontam que TCWV, AOD e TOC são os principais moduladores do UVI na região estudada, enquanto COT, $PM_{2.5}$ e PM_{10} desempenham papéis secundários, com menor importância relativa na modelagem.

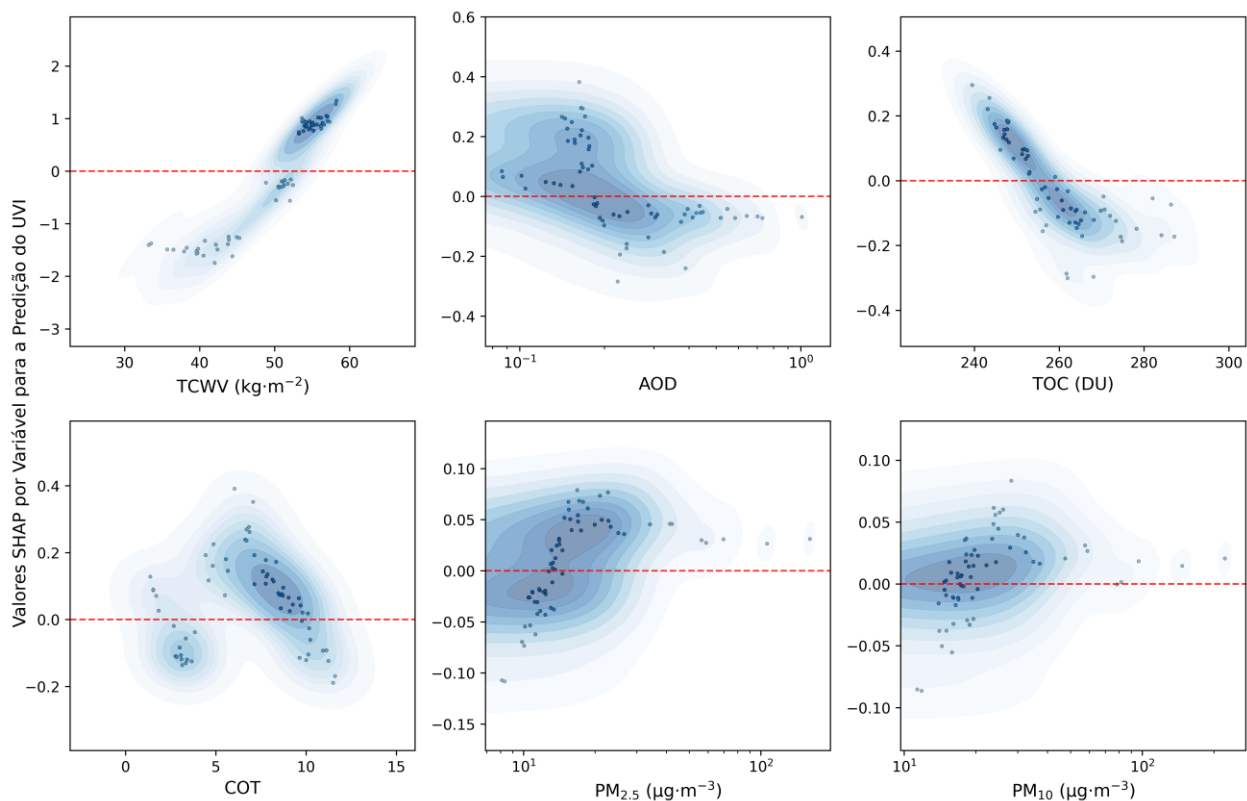


Figura 5-4 - Distribuição dos valores SHAP para as variáveis preditoras do modelo Random Forest na estimativa do Índice de Radiação Ultravioleta (UVI). Cada ponto representa um valor SHAP correspondente a uma observação no conjunto de teste, indicando o impacto de cada variável na previsão do modelo. A escala de cores representa os valores normalizados das variáveis, onde azul indica valores mais baixos e vermelho valores mais altos. Valores SHAP positivos contribuem para o aumento da predição do UVI, enquanto valores negativos reduzem sua estimativa.

5.2.4 Índice de suscetibilidade aos riscos associados ao UV

A distribuição dos valores do Índice de Suscetibilidade (*IS*), representada na Figura 5-5, assimétrica à direita, com maior concentração de indivíduos nas faixas centrais – especialmente nas classificações de suscetibilidade moderada e alta –, situadas próximas à média da escala z. Observam-se ainda picos bem definidos nas curvas de densidade, indicando a existência de agrupamentos internos de indivíduos com perfis semelhantes de risco. Esses padrões podem refletir desigualdades estruturais quanto ao acesso à saúde, à escolaridade, às condições de moradia e à adoção de medidas de fotoproteção, sugerindo que, embora existam casos extremos de suscetibilidade, a maioria da amostra encontra-se em níveis intermediários de risco.

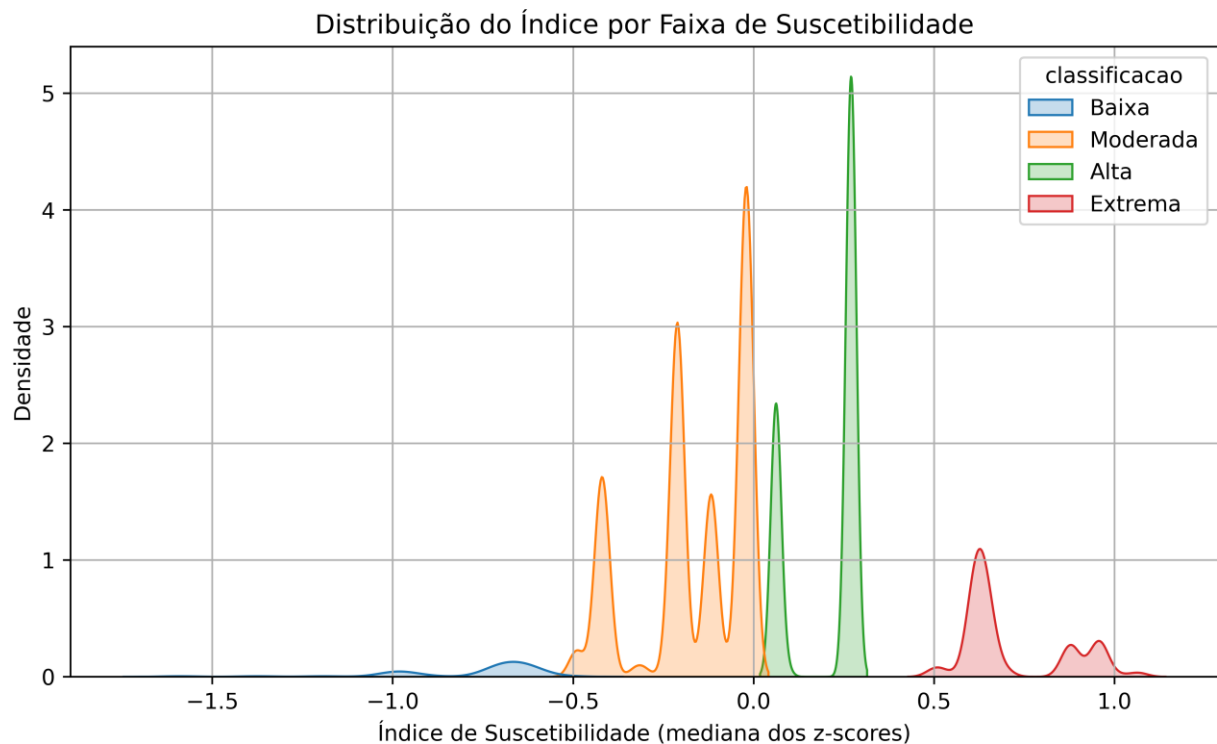


Figura 5-5 - Distribuição de densidade dos valores individuais do Índice de Suscetibilidade (IS), calculado com base na mediana dos z-scores de variáveis socioeconômicas, comportamentais e biológicas. As cores azul, laranja, verde e vermelho, representam, respectivamente, as faixas classificatórias: baixa ($IS < -0,5$), moderada ($-0,5 \leq IS \leq 0$), alta ($0 < IS \leq 0,5$) e extrema ($IS > 0,5$).

A maior parte da amostra foi classificada nas faixas de suscetibilidade moderada ($-0,5 \leq IS \leq 0$) e alta ($0 < IS \leq 0,5$), correspondendo a 55,7% e 27,9% dos indivíduos, respectivamente (Figura 5.X). Indivíduos com suscetibilidade extrema ($IS > 0,5$) representaram 13,4% da amostra, enquanto apenas 3,1% apresentaram baixa suscetibilidade ($IS < -0,5$) (Figura 5-6).

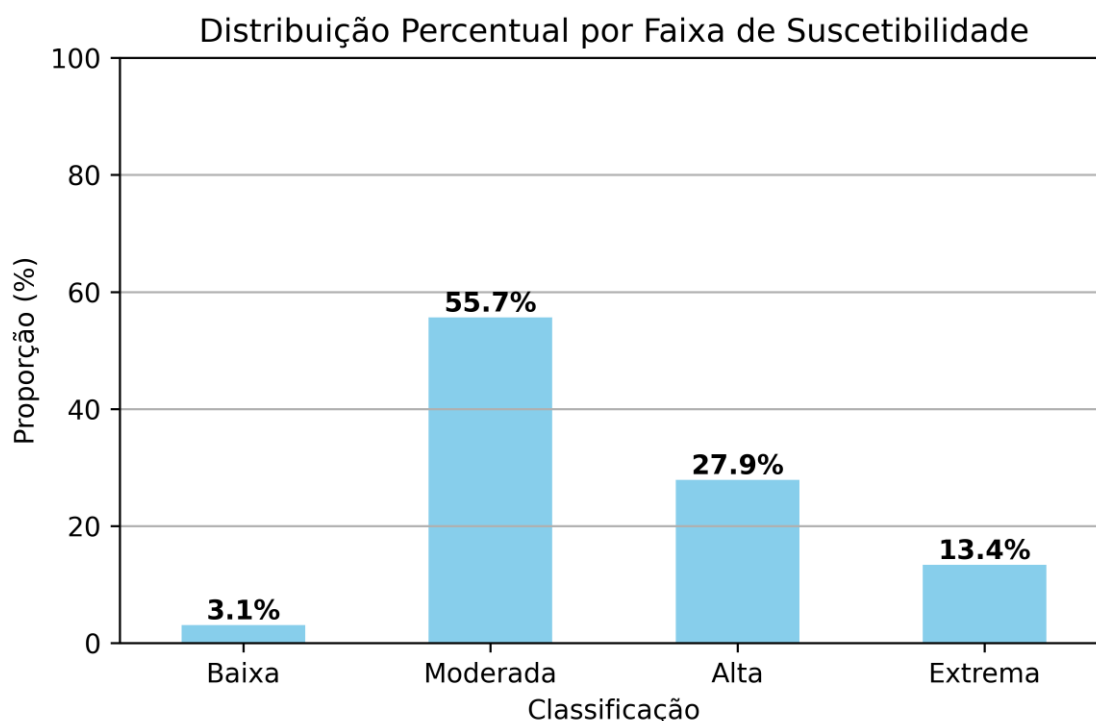


Figura 5-6 - Percentual de indivíduos classificados em quatro faixas de suscetibilidade com base na mediana dos z-scores padronizados: baixa ($IS < -0,5$), moderada ($-0,5 \leq IS \leq 0$), alta ($0 < IS \leq 0,5$) e extrema ($IS > 0,5$).

A Figura 5-7 ilustra a contribuição relativa de cada variável na composição do *IS*, segmentada por faixa classificatória (baixa, moderada, alta e extrema). As contribuições foram calculadas com base nas médias dos valores absolutos dos z-scores padronizados e expressas em termos percentuais, conforme metodologia descrita anteriormente.

Na faixa de baixa suscetibilidade (Figura 5-7a), observou-se uma distribuição relativamente equilibrada entre as variáveis, com destaque para o fototipo cutâneo (14,7%), acesso à saúde (14,1%) e cuidados com a fotoproteção (13,2%). Já a densidade familiar apresentou o menor peso relativo (9,1%), sugerindo menor influência desse fator em indivíduos com menor risco relativo à exposição UV.

Na suscetibilidade moderada (Figura 5-7b), os fatores com maior contribuição foram o tempo de exposição ao sol (18,4%), os cuidados adotados (17,6%) e a escolaridade (17,0%). Notavelmente, a variável saúde apresentou a menor participação percentual (1,4%), o que pode indicar maior homogeneidade desse fator entre os indivíduos com suscetibilidade intermediária.

Na faixa de alta suscetibilidade (Figura 5-7c), a condição de moradia (variável “residência”) destacou-se como o principal fator (20,4%), seguida por tempo de exposição (16,5%) e cuidados com a fotoproteção (15,8%). Essa predominância pode refletir vulnerabilidades estruturais que potencializam o risco em grupos com limitações habitacionais e rotinas mais intensas de exposição solar.

Por fim, entre os indivíduos com suscetibilidade extrema (Figura 5-7d), as maiores contribuições foram novamente atribuídas ao tempo de exposição (17,8%), cuidados (17,4%), escolaridade (17,2%) e renda bruta familiar (17,0%). Esses resultados evidenciam a influência de múltiplos determinantes socioeconômicos e comportamentais na elevação do risco, com ênfase na combinação entre longos períodos de exposição e menores recursos educacionais e financeiros.

Contribuição Percentual das Variáveis por Faixa de Suscetibilidade (Destaque $\geq 70\%$)

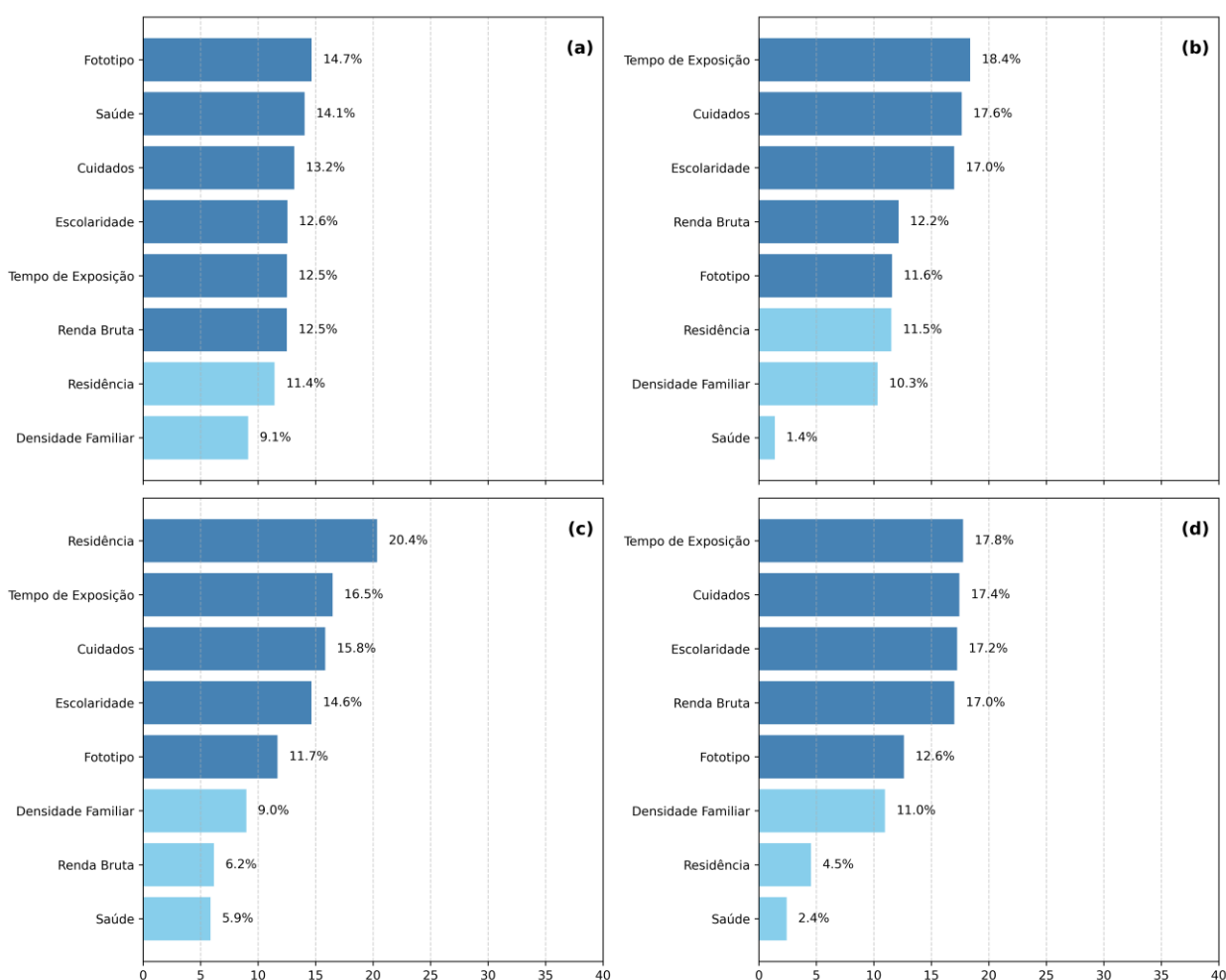


Figura 5-7 - Distribuição percentual das contribuições das oito variáveis analisadas (fototipo, tempo de exposição, cuidados, renda, escolaridade, densidade domiciliar, saúde e residência) em cada faixa de

suscetibilidade: (a) baixa, (b) moderada, (c) alta e (d) extrema. Valores baseados na média dos z-scores absolutos e convertidos proporcionalmente por grupo. Destaques visuais foram atribuídos às variáveis que, somadas, representam ao menos 70% da composição em cada faixa.

A Tabela 5-1 apresenta a mediana das doses estimadas de radiação ultravioleta (UV) e a proporção de indivíduos cuja exposição diária ultrapassou a Dose Mínima Eritemal (MED), conforme a classificação do *IS*.

Observa-se uma relação positiva entre o nível de suscetibilidade e a dose UV estimada, refletindo maior carga de exposição entre os indivíduos com maior *IS*. A mediana da dose UV foi de 14,5 mJ/cm² para indivíduos com baixa suscetibilidade, aumentando progressivamente nas demais faixas: 25,4 mJ/cm² (moderada), 36,3 mJ/cm² (alta) e 65,4 mJ/cm² (extrema).

De forma consistente, a proporção de indivíduos com exposição acima da MED também se elevou substancialmente: de 16,7% na faixa de menor risco para 91,8% na faixa de suscetibilidade extrema. Este padrão reforça a validade do índice proposto, uma vez que os grupos mais suscetíveis de acordo com o *IS* são também os mais expostos ao risco efetivo de dano cutâneo, conforme o critério fisiológico da MED.

Tabela 5-1 - Relação entre a classificação do Índice de Suscetibilidade (*IS*), a carga estimada de exposição à radiação UV (em mJ/cm²) e a porcentagem de indivíduos cuja dose diária ultrapassou a MED, definida conforme o fototipo cutâneo.

Classificação do <i>IS</i> por faixa	% de Indivíduos por faixa	Dose UV (mJ/cm ²) (mediana)	% de Indivíduos com Dose UV acima da MED
Baixa	3,1	14,5	16,7
Moderada	55,7	25,4	48,2
Alta	27,9	36,3	82,4
Extrema	13,4	65,4	91,8

A análise estatística revelou diferenças significativas na dose UV estimada entre as faixas do *IS*. O teste de Kruskal-Wallis indicou que pelo menos uma das faixas difere significativamente das demais quanto à mediana da dose UV recebida ($H = 246,70$; $p < 0,001$).

A análise *post hoc*, realizada por meio do teste de Dunn com correção de Holm, identificou diferenças estatisticamente significativas entre todos os pares de faixas de suscetibilidade (Tabela 5.X). Especificamente:

Tabela 5-2 - Todos os pares apresentaram diferenças estatisticamente significativas ($p < 0,05$), indicando que a dose UV estimada varia de forma sistemática entre os grupos de suscetibilidade definidos.

	Baixa	Moderada	Alta	Extrema
Baixa	–	$1,5 \times 10^{-4}$	$2,0 \times 10^{-12}$	$1,2 \times 10^{-22}$
Moderada		–	$7,3 \times 10^{-19}$	$5,6 \times 10^{-40}$
Alta			–	$5,4 \times 10^{-9}$
Extrema				–

Todas as comparações foram estatisticamente significativas ao nível de 5%, o que reforça a robustez da associação entre o índice de suscetibilidade e a carga de exposição à radiação UV.

As medianas da dose UV estimada acompanharam a ordenação esperada, crescendo gradualmente entre as faixas: 14,5 mJ/cm² (baixa), 25,4 mJ/cm² (moderada), 36,3 mJ/cm² (alta) e 65,4 mJ/cm² (extrema), demonstrando um gradiente de risco diretamente proporcional ao índice proposto.

5.3 Discussão

5.3.1 Padrões mensais interanuais e ciclo anual de variáveis atmosféricas

Os padrões sazonais observados para PM_{2.5}, PM₁₀ e AOD evidenciam a influência da sazonalidade climática e das emissões de aerossóis sobre a composição atmosférica na Amazônia. O aumento expressivo das concentrações de material particulado entre julho e outubro está fortemente relacionado ao período seco, quando a redução da precipitação favorece a permanência de partículas em suspensão e intensifica o transporte atmosférico de aerossóis (Artaxo et al., 2013; Nascimento et al., 2021). Esse padrão já foi identificado em diversas áreas da Amazônia, sendo impulsionado principalmente pelo aumento das queimadas antropogênicas e incêndios florestais nesse período (Morais et al., 2022; Sands et al., 2024).

A dispersão dos valores de PM_{2.5} e PM₁₀ durante os meses mais secos sugere que eventos episódicos, como incêndios de grande escala, podem intensificar a poluição atmosférica em determinados anos. Esse comportamento já foi documentado em estudos que analisaram períodos de secas extremas, nos quais as emissões de queimadas aumentam consideravelmente, impactando a qualidade do ar e as condições climáticas regionais (Aragão et al., 2018).

A correlação entre os picos de AOD e $PM_{2.5}/PM_{10}$ reforça a associação entre a queima de biomassa e o aumento da concentração de aerossóis na atmosfera. A profundidade óptica dos aerossóis é amplamente utilizada como indicador dessa concentração e tem sido associada à sazonalidade das queimadas na Amazônia (Palácios et al., 2020). Esse comportamento é semelhante ao observado em outras regiões tropicais afetadas por emissões da queima de biomassa, como o Sudeste Asiático e a Savana Africana, onde as estações secas intensificam a presença de aerossóis na coluna atmosférica (Lee et al., 2018; Yin et al., 2019; Adam et al., 2021; Duc et al., 2021; Palácios et al., 2022).

A associação entre as concentrações de material particulado e o regime de precipitação também é evidente. Durante a estação chuvosa, as chuvas atuam como um mecanismo eficiente de remoção de partículas suspensas, reduzindo significativamente os níveis de $PM_{2.5}$ e PM_{10} . Esse processo já foi demonstrado em estudos que indicam a deposição úmida como um dos principais mecanismos de controle da poluição atmosférica na Amazônia, especialmente no período entre dezembro e maio (Machado et al., 2021; Correia Filho et al., 2024).

Os padrões sazonais observados para TCWV e COT reforçam a forte relação entre a umidade atmosférica e a cobertura de nuvens na região amazônica. O aumento dos valores de TCWV e COT nos meses úmidos reflete a intensificação dos processos de convecção atmosférica e o transporte de umidade da superfície para a troposfera, um fenômeno característico da estação chuvosa na Amazônia (Leite-Filho et al., 2019; Fu et al., 201). A redução progressiva dessas variáveis a partir de maio e terminando em setembro coincide com a estação seca, período no qual a subsidência atmosférica e a menor taxa de evapotranspiração contribuem para a redução da umidade e da cobertura de nuvens (Limberger & Silva, 2016; Martins et al., 2023).

A diminuição da COT durante a estação seca pode ter implicações diretas no balanço radiativo da região, aumentando a penetração da radiação solar à superfície (Aebi et al., 2020). Estudos anteriores indicam que a redução na cobertura de nuvens na Amazônia está associada ao enfraquecimento da convecção profunda, um processo amplificado por alterações no uso da terra e pela intensificação das queimadas (Ruiz-Vásquez et al., 2020; Leite-Filho et al., 2021). Além disso, a redução da COT pode modificar a distribuição de aerossóis na atmosfera, influenciando a extinção óptica dos aerossóis e os processos de interação radiação-aerossol (Herbert & Stier, 2023).

O ciclo anual da TOC revela um padrão distinto em relação a TCWV e COT, com os menores valores registrados no primeiro semestre do ano e um aumento gradual até atingir

máximos entre setembro e outubro. Esse comportamento está de acordo com estudos que indicam que a circulação estratosférica e troposférica influencia a distribuição do ozônio na região tropical (Bernhard et al., 2023; Tian et al., 2023; Bencherif et al., 2024).

5.3.2 *Padrões mensais interanuais e ciclo anual do índice UV*

Os padrões sazonais do UVI refletem a interação entre processos atmosféricos e astronômicos que modulam a radiação UV à superfície. A ciclo anual observado, com máximos entre janeiro e abril e mínimos entre junho e agosto, evidencia que múltiplos fatores atuam no ciclo anual da radiação UV.

Embora a TCWV e a COT apresentem máximos nos meses chuvosos (janeiro-abril) e mínimos entre junho e setembro, o UVI mantém valores elevados nos meses úmidos. Isso sugere que, apesar da atenuação parcial da radiação UV por nuvens e vapor d'água, a maior incidência de radiação UV nesse período, devido ao menor ângulo zenital solar, desempenha um papel predominante na intensificação do UVI. Estudos prévios indicam que o ângulo zenital solar é um dos principais moduladores sazonais da radiação UV à superfície, influenciando diretamente a quantidade de radiação que penetra na atmosfera (Lopo et al., 2013; Bernhard et al., 2023; Alves et al., 2025).

A redução progressiva do UVI entre maio e agosto ocorre simultaneamente à diminuição dos valores de TCWV e COT, sugerindo que a dispersão e absorção da radiação UV na atmosfera se tornam mais intensas nesse período. Isso está diretamente relacionado ao aumento do ângulo zenital solar, que faz com que a radiação UV percorra um caminho mais longo na atmosfera antes de atingir a superfície, resultando em maior espalhamento e absorção da radiação ultravioleta (Bais et al., 2019; Reis et al., 2023; Alves et al., 2025).

Outro fator modulador relevante é a TOC, que exibe um padrão sazonal distinto das demais variáveis analisadas. Os menores valores de TOC ocorrem no primeiro semestre do ano, enquanto os valores máximos são observados entre setembro e novembro. O aumento gradual da TOC ao longo do ano pode exercer um efeito adicional de atenuação da radiação UV à superfície, já que concentrações mais elevadas de ozônio atuam como um filtro natural para a radiação UVB, especificamente com maior atenuação em comprimentos de onda menores que 305 nm (Bernhard et al., 2023; Alves et al., 2025). Consequentemente, o UVI que é calculado com base na irradiância espectral ponderada pelo espectro de ação eritemal, onde os comprimentos de onda na faixa do

UVB contribuem de forma mais efetiva para sua magnitude, as variações sazonais da TOC têm um impacto direto sobre o UVI do que sobre a irradiância total de UV (Diffey, 2002; Webb et al., 2011; Moshhammer et al., 2016). No entanto, a influência sazonal da TOC na modulação do UVI na Amazônia pode ser relativamente menor, considerando que suas variações ao longo do ano são menos expressivas em comparação com as observadas em latitudes médias e altas (Vitt et al., 2020; Fountoulakis et al., 2021).

Os níveis de exposição ao UV registrados neste estudo, frequentemente classificados como “muito altos” (8–10) e “extremos” (≥ 11) ao longo do ano, destacam a importância da adoção de medidas preventivas contra os efeitos adversos da radiação UV na população (Holick, 2020; Neale et al., 2023). Estudos epidemiológicos indicam que a exposição crônica a esses níveis pode aumentar significativamente o risco de danos ao DNA, imunossupressão e incidência de câncer de pele (Leiter et al., 2020; Lee et al., 2020; Ciałżyńska et al., 2021; Al-Sadek & Yusuf, 2024). A persistência de valores críticos de UVI nos primeiros meses do ano reforça a necessidade de estratégias voltadas às populações mais vulneráveis, especialmente aquelas que exercem atividades ao ar livre, como trabalhadores rurais e comunidades ribeirinhas (Ceballos et al., 2014; Silva et al., 2016; Garnelo et al., 2020).

5.3.3 *Análise de Tendências*

5.3.3.1 *Tendências de variáveis atmosféricas*

Os resultados deste estudo indicam que, apesar da localização da área de estudo no chamado “Arco do Desmatamento” – uma região amplamente documentada por apresentar elevadas taxas de conversão florestal e emissões de aerossóis – as concentrações médias anuais de $PM_{2.5}$ e PM_{10} não apresentaram tendências crescentes estatisticamente significativas. Além disso, a AOD permaneceu relativamente estável ao longo do período analisado. Esse achado contraria a expectativa geral de que o aumento do desmatamento e das queimadas levaria a um crescimento expressivo na carga de aerossóis atmosféricos. Diferentes fatores podem estar modulando essa relação entre mudanças no uso da terra e as propriedades dos aerossóis na atmosfera.

Uma possível explicação envolve a variabilidade nos padrões de queima da biomassa ao longo dos anos. Embora as queimadas ainda sejam um processo recorrente na Amazônia, sua intensidade e distribuição sazonal podem ter variado ao longo do tempo, influenciando a emissão de partículas e, conseqüentemente, suas tendências temporais. Estudos anteriores indicam que a

variabilidade interanual das queimadas está fortemente associada às condições climáticas, particularmente a padrões de seca e umidade (Aragão et al., 2008; Biscaro et al., 2021). Anos com maior umidade relativa tendem a reduzir a severidade das queimadas e, consequentemente, as emissões de material particulado.

Além disso, mudanças nas práticas de uso da terra podem ter impactado as emissões de aerossóis. O avanço da agricultura mecanizada e a substituição de queimadas por práticas de desmatamento sem fogo em algumas áreas podem ter reduzido as emissões diretas de material particulado, mesmo diante da continuidade do desmatamento (Stabile et al., 2020; Silva Junior et al., 2021). Esse fenômeno já foi destacado em algumas partes da Amazônia, onde a conversão florestal para pastagens e lavouras nem sempre resulta em um aumento proporcional das emissões atmosféricas devido a diferenças nos métodos de manejo da terra (Figueiredo et al., 2020; Silveira et al., 2022).

Outro fator relevante é o transporte e a dispersão atmosférica dos aerossóis. A Amazônia está sujeita a padrões meteorológicos que influenciam fortemente a concentração e a permanência dos aerossóis na atmosfera. O transporte de partículas por ventos de grande escala e a deposição úmida durante a estação chuvosa são processos fundamentais na remoção de aerossóis (Zanin et al., 2022). Assim, mesmo que as emissões de material particulado tenham aumentado localmente, esses processos podem ter limitado a detecção de tendências significativas na concentração média anual dos aerossóis.

A estabilidade observada na AOD sugere, ainda, que mudanças na composição dos aerossóis podem estar compensando o efeito de aumento das concentrações de material particulado. A AOD não reflete apenas a massa total de partículas, mas também suas propriedades ópticas, como tamanho, composição química e índice de refração, que afetam a eficiência de espalhamento e absorção da radiação solar (Li et al., 2016). Se houve uma alteração na composição dos aerossóis ao longo do tempo – por exemplo, uma substituição de partículas mais eficientes no espalhamento (e.g., sulfatos) por partículas mais absorvedoras (e.g., carbono negro) –, a AOD poderia permanecer relativamente estável mesmo diante de mudanças na concentração de $PM_{2.5}$ e PM_{10} (Che et al., 2015).

Por fim, fatores como variações na umidade relativa e na deposição atmosférica podem ter influenciado a detecção de tendências nos aerossóis. A umidade relativa afeta a higroscopicidade das partículas, modificando seu tamanho e, consequentemente, sua contribuição para a AOD

(Tsekeri et al., 2017). Da mesma forma, mudanças nos processos de deposição úmida e seca ao longo do período podem ter alterado a taxa de remoção de partículas da atmosfera, modulando suas tendências temporais.

Destarte, esses achados ressaltam a complexidade das interações entre mudanças no uso da terra e propriedades atmosféricas. A ausência de tendências significativas nas concentrações de material particulado e na AOD sugere que múltiplos fatores podem estar atuando simultaneamente, equilibrando os efeitos das emissões primárias e dos processos de remoção atmosférica (Moreira et al., 2021). Além disso, é importante considerar o transporte regional de aerossóis, especialmente durante a estação seca, quando plumas de fumaça provenientes da Amazônia central podem atingir regiões distantes. Um exemplo notável foi o episódio de 19 de agosto de 2019, quando aerossóis de queimadas, transportados desde o centro da América do Sul, atingiram o sudeste brasileiro e provocaram uma redução extrema na irradiância solar na Região Metropolitana de São Paulo, culminando no fenômeno conhecido como “chuva preta” (Santana et al., 2025). Esse evento evidenciou a intensa interação entre fumaça e nuvens e ilustrou o potencial de impactos radiativos significativos em áreas afastadas da fonte emissora.

Assim, as concentrações locais observadas na área de estudo podem não refletir toda a carga gerada, sendo moduladas por processos de circulação atmosférica. Estudos futuros podem explorar com mais profundidade as trajetórias de transporte de aerossóis, os efeitos ópticos em larga escala e o papel das interações microfísicas na modulação da radiação solar incidente em regiões tropicais e subtropicais da América do Sul.

A tendência decrescente da TCWV, com variação anual de $-0,04 \text{ kg/m}^2$, embora não estatisticamente significativa, pode estar associada a variações naturais no ciclo hidrológico e a mudanças nos padrões de circulação atmosférica (Xu et al., 2022). Estudos anteriores indicam que a variabilidade interanual do vapor de água na atmosfera está fortemente ligada a fenômenos climáticos de grande escala, como El Niño e La Niña, que influenciam a distribuição de umidade em regiões tropicais (Shi et al., 2018; Allan et al., 2022; Saha et al., 2022).

A redução estatisticamente significativa da COT observada neste estudo sugere um enfraquecimento da cobertura de nuvens ao longo do período estudado. Esse declínio pode estar relacionado a mudanças na dinâmica atmosférica e nos fluxos de umidade, bem como à interação com os aerossóis atmosféricos (Sirithian & Thanatrakolsri, 2022). Estudos mostram que a presença de aerossóis pode afetar a formação e a microfísica das nuvens, alterando suas propriedades ópticas

e sua capacidade de refletir a radiação solar (Benas et al., 2020). Estudos prévios já demonstraram que a COT está fortemente correlacionada com a irradiância ultravioleta, especialmente no espectro UVA (320–400 nm), uma vez que a atenuação dessa faixa ocorre principalmente por espalhamento e absorção dentro das camadas superiores das nuvens (Miguel et al., 2011; Silva, 2013; Jebar et al., 2020).

Um estudo recente conduzido por Alves et al. (2025) reforça essa relação, indicando que a COT e a radiação UVA possuem uma correlação negativa expressiva, ou seja, à medida que a COT diminui, a irradiância UVA à superfície aumenta. No entanto, esse mesmo estudo não identificou uma relação semelhante para comprimentos de onda menores que 320 nm (UVB), o que sugere que a redução da COT pode não ter um impacto significativo sobre o UVI. Isso ocorre porque o UVI é parametrizado com maior ênfase nos comprimentos de onda mais curtos do UVB, onde outros fatores atmosféricos, como a TOC, desempenham um papel mais dominante na absorção da radiação.

Dessa forma, embora a diminuição da COT possa ter implicações relevantes para a exposição à radiação UVA, especialmente em períodos de alta transmissividade atmosférica, os impactos diretos sobre o UVI podem ser limitados. No entanto, essa relação ainda pode ser modulada por fatores adicionais, como variações nos aerossóis atmosféricos e mudanças na dinâmica da TCWV, que afetam tanto a absorção quanto o espalhamento da radiação UV.

Por outro lado, a TOC apresentou uma tendência de crescimento significativa ($p < 0,05$), com uma taxa de 0,32 DU por ano. Embora esse aumento possa inicialmente sugerir um sinal de recuperação da camada de ozônio (Morgenstern et al., 2008; Eleftheratos et al., 2015; Lakkala et al., 2017; Souza et al., 2020), é importante destacar que, em regiões tropicais como a área deste estudo, tais tendências positivas podem ser influenciadas por aumentos no ozônio troposférico, associados à poluição e às queimadas regionais e transcontinentais, e não necessariamente refletirem uma recuperação do ozônio estratosférico, cujas mudanças são mais perceptíveis em altas latitudes.

Estudos recentes, como o de Bencherif et al. (2024), demonstram que, apesar de tendências levemente positivas na TOC, o ozônio estratosférico apresenta reduções significativas na região equatorial, possivelmente relacionadas a mudanças na circulação estratosférica induzidas pelas mudanças climáticas. Nesse contexto, torna-se fundamental analisar separadamente as diferentes camadas atmosféricas, uma vez que a variabilidade interanual da TOC pode mascarar

tendências divergentes entre a troposfera e a estratosfera (Bais et al., 2019; Eleftheratos et al., 2020).

Assim, a variabilidade e as tendências observadas na TOC refletem, portanto, a interação entre processos de transporte atmosférico, como a circulação de Brewer–Dobson, e fontes troposféricas de ozônio associadas a atividades antrópicas. A circulação de Brewer–Dobson é responsável pelo transporte do ozônio formado na estratosfera tropical para latitudes médias e altas, o que pode resultar em valores persistentemente mais baixos de ozônio estratosférico sobre regiões equatoriais (Bais et al., 2019). Alterações nessa circulação, induzidas pelas mudanças climáticas, podem afetar significativamente a distribuição latitudinal e vertical do ozônio, com impactos diretos sobre a quantidade de ozônio estratosférico na região estudada (Bencherif et al., 2024).

Dessa forma, ao interpretar os aumentos observados na TOC, é essencial distinguir se esses incrementos decorrem de uma recuperação do ozônio estratosférico ou do acúmulo de ozônio troposférico, de origem predominantemente antropogênica, o que não é possível fazer com as informações disponíveis, nem é foco do presente estudo.

5.3.3.2 *Tendências do índice UV*

A análise das tendências temporais do UVI revelou uma leve redução ao longo do período estudado (-0,01 por ano), sem significância estatística. Essa estabilidade sugere que os principais fatores atmosféricos que modulam a transmissão da radiação UV — como a TOC, a COT e a carga de aerossóis — atuaram de forma compensatória.

A redução significativa da COT favorece um aumento na irradiância UVA à superfície, mas não na UVB conforme verificado por Alves et al. (2025). No entanto, a leve tendência de aumento da TOC, pode ter impactado no UVI, já que o ozônio é o principal absorvedor da radiação UVB (Bais et al., 2019). Além disso, os aerossóis atmosféricos (PM_{2.5}, PM₁₀) e AOD, mesmo sem tendências significativas, podem modular a transmissão da radiação UV por processos de espalhamento e absorção, além de influenciarem indiretamente a formação de nuvens (Sirithian & Thanatrakolsri, 2022).

5.3.3.3 *A importância das variáveis na predição do índice UV*

A associação positiva entre altos valores de TCWV e o aumento do UVI, conforme indicado pelos valores SHAP, evidencia a complexidade das interações atmosféricas que modulam a radiação UV, sobretudo em ambientes tropicais. Embora o vapor d'água em si exerça baixa absorção direta na faixa do UV, sua presença está fortemente associada à formação de nuvens, que

atuam como atenuadoras principalmente por espalhamento. No entanto, essa atenuação não é tão eficaz quanto no espectro infravermelho, permitindo que a radiação UV atinja níveis consideráveis mesmo sob céu parcialmente nublado (Iqbal, 1983; Liou, 2002; Silva, 2011). Estimativas indicam que, nas regiões tropicais, a irradiância UV sob nuvens pode alcançar até 75% da irradiância em céu claro (Diffey B. L., 2002). Essa dinâmica é ainda mais evidente quando se considera que, em regiões tropicais de alta altitude, como os Andes chilenos, foram registrados valores extremos de UVI (>20), mesmo sob baixos níveis de vapor d'água, ozônio e aerossóis — reforçando que diferentes combinações de fatores atmosféricos, dependendo do contexto geográfico, podem favorecer a intensificação da radiação UV na superfície (Häder & Cabrol, 2020).

Assim, os efeitos positivos do TCWV observados no presente estudo não se devem ao vapor d'água isoladamente, mas à sua relação com condições atmosféricas que, em conjunto, favorecem a transmissão da radiação UV. Esse cenário reforça a pertinência da abordagem metodológica adotada neste estudo, baseada em modelos não lineares e na interpretação via SHAP, que permite capturar a complexidade e a interação entre múltiplos moduladores atmosféricos do UVI.

Embora estudos anteriores tenham confirmado a influência da TOC e do PM_{10} na modulação do UVI, como demonstrado por Bojilova et al. (2022) para a cidade de Sófia, os autores assumem uma relação linear direta entre essas variáveis e o UVI, com base em regressão linear múltipla. No presente estudo, entretanto, os resultados obtidos por meio da análise SHAP revelam que, apesar da TOC apresentar uma influência predominantemente negativa sobre o UVI, essa relação é não linear, variando ao longo do espectro observado. Essa abordagem, baseada em aprendizado de máquina, permite considerar interações complexas e simultâneas entre múltiplos fatores atmosféricos, o que se mostra especialmente relevante em regiões tropicais, onde a dinâmica atmosférica é fortemente sazonal e interdependente.

Portanto, a análise proposta neste trabalho amplia a compreensão sobre a modulação da radiação UV ao considerar padrões não lineares e efeitos combinados, indo além das abordagens tradicionais baseadas em dependências funcionais fixas, as quais podem conter problemas com variáveis carregadas de multicolinearidades.

O comportamento negativo da AOD observado nos valores SHAP, com maior densidade de pontos abaixo da linha de base, indica que concentrações mais elevadas de aerossóis tendem a atenuar a radiação UV por meio de processos de absorção e espalhamento. Esse resultado é

coerente com a literatura, que tem documentado reduções significativas na irradiância UV em superfície associadas ao aumento da profundidade óptica dos aerossóis (Kim et al., 2013). Estudos prévios indicam que essa atenuação pode variar de forma expressiva, dependendo das propriedades físico-químicas e ópticas dos aerossóis, por exemplo, Liu et al. (1991) demonstraram que em áreas não urbanas do leste dos EUA e da Europa, a irradiância UVB reduziu entre 5 e 18% devido a influência de causas antrópicas. Observações espectrais demonstraram reduções entre 10 e 30% na irradiância UV com o aumento da AOD (Kerr, 1997; Zerefos, 1997).

Em estudo realizado em Belsk, na Polônia, Krzyścin et al. (1998) identificaram uma redução de 0,15% na radiação UV para cada aumento de 1% na AOD a 550 nm. De forma complementar, Xia et al. (2008) analisaram a razão entre a irradiância UV e a radiação solar de onda curta de banda larga, observando uma redução de aproximadamente 26% por unidade de AOD (550 nm). Já Kylling et al., (1998) demonstraram que a presença de aerossóis pode reduzir a irradiância UVB em proporções que variam entre 5% e 53%, dependendo das características das partículas atmosféricas e das condições radiativas locais.

Essa influência negativa da AOD sobre o UVI observada neste estudo também encontra respaldo em análises baseadas no *Radiation Amplification Factor* (RAF), utilizadas para quantificar a sensibilidade da radiação UV à presença de aerossóis e ozônio em diferentes condições solares. Estudos realizados na Coreia do Sul por Cho et al. (2000) e Kim et al. (2008) mostraram que o RAF pode variar de acordo com o ângulo zenital solar (SZA) e com os níveis de AOD ou ozônio, confirmando que a modulação da radiação UV por esses fatores não é constante, mas dependente do contexto atmosférico e geométrico.

Embora o presente trabalho não estime explicitamente os RAFs, os padrões identificados pelos valores SHAP indicam comportamento semelhante, reforçando o papel atenuador dos aerossóis detectado por meio da AOD, ainda que os materiais particulados (PM_{2.5} e PM₁₀) tenham apresentado baixa relevância na modelagem, sugerindo que a carga total de aerossóis na coluna atmosférica exerce maior influência sobre o UVI do que as concentrações próximas à superfície.

Desta forma, a AOD teve um impacto expressivo, enquanto os materiais particulados PM_{2.5} e PM₁₀ apresentaram menor influência. Essa distinção reflete diferenças fundamentais entre essas variáveis e sua interação com a radiação ultravioleta na atmosfera. Se por um lado, a AOD influencia o UVI por meio de processos de espalhamento e absorção da radiação UV em diferentes altitudes, ou seja, ao longo de toda a coluna atmosférica, aerossóis dispersivos, como sulfatos e

nitratos, tendem a espalhar a radiação, reduzindo sua intensidade à superfície. Em contrapartida, aerossóis absorvedores, como o carbono negro e a poeira mineral, tendem também a reduzir a radiação UV à superfície, só que, como consequência, podem aquecer a atmosfera e potencialmente modificar os padrões de circulação, influenciando a transmissão da radiação UV (Muyimbwa et al., 2015; Campanelli et al., 2022; Morais et al., 2022).

Tais evidências confirmam os padrões detectados neste estudo, atribuindo à AOD uma importância relevante e predominantemente negativa na modelagem do UVI, ainda que esse efeito possa variar conforme a composição, tamanho e altura da camada de aerossóis na coluna atmosférica.

A COT mostrou uma influência predominantemente positiva nos valores SHAP, com maior densidade de pontos positivos entre valores intermediários da variável. Esse padrão sugere que, em determinados regimes atmosféricos, nuvens mais finas ou parcialmente transparentes podem permitir a penetração da radiação UV, resultando em valores de UVI mais elevados do que o esperado sob céu encoberto. Esse comportamento encontra respaldo na literatura, que destaca a heterogeneidade espacial e temporal das nuvens como um fator complicador na quantificação precisa das interações radiação-nuvem, especialmente na componente difusa da radiação UV (Tiba & Leal, 2017; Jebar et al., 2020). Estudos anteriores demonstram que, embora as nuvens geralmente atuem como atenuadoras da radiação (Calbó et al., 2005), sob determinadas condições — como céu parcialmente nublado ou com nuvens do tipo cúmulo —, pode haver aumento na irradiância UV em superfície. Miguel et al. (2011), por exemplo, observaram incrementos de até 22% na radiação UV em condições de cobertura parcial, e Silva (2013) identificou níveis elevados de UV ao meio-dia em seu estudo mesmo sob céu nublado com presença de cúmulos. Além disso, estudos como os de Mayer et al. (1998), Lindfors & Arola (2008) e Kylling et al. (1997) mostram que as nuvens podem ser mais transparentes à radiação UV do que à radiação do espectro visível, contribuindo para explicar os efeitos observados no presente estudo em faixas intermediárias da COT.

Outro fator a ser considerado é a interação da COT com a TCWV e os aerossóis. Como a TCWV apresentou um impacto expressivo no UVI, é possível que sua influência esteja relacionada, pelo menos em parte, ao efeito conjunto com as nuvens. Além disso, aerossóis podem modificar a formação e a dissipação das nuvens, influenciando indiretamente a transmissão da radiação UV (Aebi et al., 2020; Jebar et al., 2020)

Dessa forma, apesar da COT ser um fator essencial na modulação da radiação UV, sua menor importância relativa no modelo pode ser explicada por efeitos não-lineares das nuvens sobre a radiação UV, pela alta variabilidade espacial e temporal da cobertura de nuvens na região amazônica e por sua interação com outras variáveis atmosféricas, que podem ter desempenhado um papel dominante na predição do UVI.

5.3.4 Índice de suscetibilidade aos riscos associados ao UV

A distribuição assimétrica dos valores do Índice de Suscetibilidade (*IS*), com predominância de indivíduos classificados nas faixas moderada e alta, revela um panorama preocupante de exposição potencial aos riscos associados à radiação UV. O acúmulo de observações em torno da média da escala padronizada sugere que, embora a suscetibilidade extrema não seja predominante, um contingente expressivo da população analisada encontra-se em condição intermediária de suscetibilidade, o que pode acarretar riscos cumulativos ao longo do tempo, sobretudo em cenários de exposição contínua e intensificada (Norval et al., 2011; Gies et al., 2018).

A presença de picos distintos nas curvas de densidade pode indicar subgrupos populacionais homogêneos internamente quanto à suscetibilidade, refletindo padrões estruturais de desigualdade. Desigualdades no acesso à saúde, à educação e à moradia têm sido amplamente reconhecidas como determinantes sociais da vulnerabilidade ambiental e sanitária (Braveman et al., 2011; Cabral & Cândido, 2019; Carvalho, 2020), influenciando diretamente a exposição à radiação solar e a capacidade de adoção de medidas protetivas.

A análise da composição percentual das variáveis por faixa do *IS* reforça essa leitura. Em indivíduos com baixa suscetibilidade, observou-se maior influência de fatores biológicos e institucionais, como o fototipo cutâneo e o acesso à saúde. Por outro lado, à medida que a suscetibilidade aumenta, cresce a importância relativa de fatores comportamentais e socioeconômicos, tais como o tempo de exposição solar, os cuidados com a fotoproteção, a escolaridade e a renda bruta familiar — uma tendência já documentada em estudos sobre riscos ambientais e desigualdade social (Freitas et al., 2014; Arruda et al., 2018; Modenese et al., 2018).

A variável residência apresentou maior peso na faixa de suscetibilidade alta, indicando que a condição de posse do imóvel — se próprio, alugado ou emprestado — está associado ao risco relativo de exposição à radiação UV. Esse resultado pode refletir desigualdades no acesso à moradia

estável e segura, sugerindo que indivíduos em condições habitacionais menos consolidadas, como imóveis alugados ou emprestados, podem estar expostos a fatores ambientais mais adversos ou ter menor autonomia para adotar medidas de fotoproteção adequadas no cotidiano. Esse tipo de indicador tem sido utilizado como marcador indireto de vulnerabilidade socioeconômica e insegurança residencial, aspectos frequentemente associados à exclusão social e à limitação no acesso a recursos preventivos (Barcellos et al., 2002; Monken & Barcellos, 2005; Nascimento Neto & Ultramari, 2022).

Na faixa de suscetibilidade extrema, destaca-se o acúmulo de determinantes negativos, com elevada contribuição de tempo de exposição, baixa escolaridade e renda reduzida. Isso evidencia um contexto de risco composto e agravado, que não decorre apenas de escolhas individuais, mas de limitações impostas por determinantes estruturais — o que reforça a necessidade de intervenções públicas intersetoriais, com ênfase em educação em saúde, proteção social e políticas urbanas adaptadas às realidades locais (Carrapato et al., 2017; Mamun & Alam, 2025; WHO, 2025).

Dessa forma, os resultados desta etapa reforçam a validade do índice proposto, não apenas em termos estatísticos, mas também na sua capacidade de refletir as dimensões sociais e ambientais da suscetibilidade à radiação UV.

5.3.5 Validação do índice de suscetibilidade

Os resultados obtidos reforçam a validade empírica do Índice de Suscetibilidade (*IS*) ao evidenciar uma associação clara entre os níveis crescentes de suscetibilidade e a carga de exposição estimada à radiação UV. A progressão ascendente nas medianas da dose UV entre as faixas — de 14,5 mJ/cm² (baixa) a 65,4 mJ/cm² (extrema) — indica um gradiente de risco coerente com o conceito do índice, sinalizando que os grupos mais suscetíveis são também os mais expostos, do ponto de vista físico e biológico, ao dano potencial induzido pela radiação solar.

Esse padrão foi corroborado pela análise estatística inferencial: o teste de Kruskal-Wallis apontou diferenças significativas nas distribuições da dose UV entre as faixas do *IS* ($H = 246,70$; $p < 0,001$), e o teste de Dunn com correção de Holm confirmou a existência de diferenças estatisticamente significativas entre todos os pares de faixas. Tais achados demonstram a robustez do índice proposto, alinhando-se a estudos que recomendam o uso de indicadores compostos

validados empiricamente como ferramentas eficazes na identificação de grupos em risco (OECD, 2008; Decancq & Lugo, 2013).

A proporção de indivíduos cuja exposição estimada ultrapassou a Dose Mínima Eritemal (MED) também seguiu esse gradiente, passando de 16,7% na faixa de menor risco para 91,8% na faixa de suscetibilidade extrema. Isso sugere que os fatores socioeconômicos, comportamentais e biológicos integrados no *IS* estão fortemente correlacionados com a probabilidade de dano cutâneo agudo, representado aqui pela ultrapassagem da MED — um critério fisiologicamente fundamentado e amplamente utilizado em estudos de risco fotobiológico (Diffey, 1991; Young et al., 2017).

Além disso, a relação entre alta suscetibilidade e elevada carga de UV estimada reforça a noção de que exposição solar desprotegida é um fenômeno multidimensional, resultante da interação entre aspectos individuais (como fototipo e tempo de exposição), condicionantes sociais (como renda e escolaridade), e limitações estruturais (como insegurança residencial ou restrições ao uso de fotoprotetores). Tais achados dialogam com estudos que vêm destacando a importância de abordagens interdisciplinares na avaliação de riscos ambientais e desigualdade em saúde (Carrapato et al., 2017; Garnelo et al., 2020; Reis et al., 2024; WHO, 2025).

Portanto, os dados indicam que o *IS*, além de ser uma medida sintética válida do risco associado à radiação UV, possui potencial prático para aplicação em contextos de vigilância em saúde pública, educação ambiental e formulação de políticas preventivas voltadas a populações expostas a altos níveis de radiação solar.

5.4 Considerações Finais

Este estudo analisou os ciclos anuais e as tendências temporais do Índice Ultravioleta e de variáveis atmosféricas na microrregião do Madeira, ao sul do Amazonas, fornecendo uma avaliação detalhada acerca da modulação da radiação UV na região. Os resultados indicam um ciclo anual do índice UV bem definido, onde entre janeiro e abril, observam-se os maiores índices de UV, enquanto entre maio e outubro os níveis são relativamente menos intensos. No entanto, ao longo de todo o ano, os valores do UVI permanecem dentro das faixas classificadas como “muito alto” (8-10) e “extremo” (≥ 11), evidenciando a necessidade de medidas preventivas contra os riscos da exposição solar excessiva.

A análise das tendências anuais revelou padrões distintos entre as variáveis estudadas. As concentrações de $PM_{2.5}$ e PM_{10} apresentaram uma tendência de aumento não significativa, enquanto a AOD manteve-se estável ao longo do tempo. A TOC mostrou um leve crescimento e estatisticamente significativo, enquanto a COT apresentou uma tendência de redução estatisticamente significativa, sugerindo possíveis impactos na transmissão da radiação UV. Embora as variáveis associadas ao UV (EDD, EDR e UVI) tenham apresentado uma tendência decrescente ao longo do período estudado, essas variações não foram estatisticamente significativas.

A avaliação da importância das variáveis atmosféricas na modulação do UVI indicou que a TCWV e a AOD são os fatores dominantes, seguidos pela TOC e COT. O vapor d'água demonstrou impacto significativo no UVI, tanto positivo quanto negativo, sugerindo que sua influência depende de interações com a cobertura de nuvens e a distribuição vertical na atmosfera. A AOD apresentou uma contribuição relevante, reforçando o papel dos aerossóis na dispersão da radiação UV, enquanto a TOC mostrou uma relação inversa, confirmando sua função primária na absorção da radiação UVB estratosférica. Em contrapartida, as variáveis COT, $PM_{2.5}$ e PM_{10} apresentaram menor influência relativa, indicando que sua contribuição para a modulação da radiação UV pode ser limitada por fatores microfísicos e sazonais.

Os achados deste estudo reforçam a necessidade de um monitoramento contínuo do UVI e das variáveis atmosféricas associadas, especialmente diante das mudanças na cobertura de nuvens e na composição atmosférica. Além disso, a persistência de níveis elevados de UVI ao longo do ano evidencia a importância de políticas de saúde pública voltadas para a conscientização sobre os riscos da exposição solar excessiva e a ampliação do acesso a medidas de fotoproteção, especialmente em populações vulneráveis da Amazônia brasileira. Pesquisas futuras devem explorar com maior profundidade as interações entre variáveis atmosféricas e a radiação UV, além de avaliar os impactos das mudanças climáticas na transmissão da radiação UV em diferentes escalas espaciais e temporais.

Complementarmente, a construção do Índice de Suscetibilidade aos riscos associados à radiação UV permitiu incorporar aspectos biológicos, comportamentais e socioeconômicos na avaliação do risco individual. Os resultados revelaram que a maioria dos indivíduos encontra-se em níveis moderados a altos de suscetibilidade, com expressiva parcela da amostra classificada na faixa extrema. A distribuição assimétrica e a composição multifatorial do índice destacam o papel

das desigualdades sociais e das práticas de fotoexposição na intensificação do risco à saúde cutânea. A validação empírica do *IS*, por meio da dose UV estimada e da ultrapassagem da Dose Mínima Eritemal (MED), reforça sua utilidade como ferramenta para vigilância em saúde ambiental e formulação de estratégias preventivas direcionadas a populações mais vulneráveis. Tais achados reiteram a necessidade de abordagens integradas que considerem tanto os determinantes atmosféricos quanto os sociais no enfrentamento dos impactos da radiação solar sobre a saúde pública na Amazônia.

5.5 Referências do Capítulo

- Adam, M. G., et al., 2021. Biomass burning-derived airborne particulate matter in Southeast Asia: A critical review. *Journal of Hazardous Materials*, **407**, 124760. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124760>
- Aebi, C. et al., 2020. Estimation of cloud optical thickness, single scattering albedo and effective droplet radius using a shortwave radiative closure study in Payerne. *Atmospheric Measurement Techniques*, **13**, 907–923. <https://doi.org/10.5194/amt-13-907-2020>
- Abdi, H., 2007. *Z-scores*. In N. J. Salkind (Ed.), *Encyclopedia of measurement and statistics* (Vol. 3, pp. 1055–1058). Sage Publications.
- Allan, R. P., et al., 2022. Global Changes in Water Vapor 1979–2020. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **127**, e2022JD036728. <https://doi.org/10.1029/2022JD036728>
- Al-Sadek, T. & Yusuf, N., 2024. Ultraviolet radiation biological and medical implications. *Current Issues in Molecular Biology*, **46**, 1924–1942. <https://doi.org/10.3390/cimb46030126>
- Alves, P. V., et al., 2025. Seasonal variations and trends in solar UV spectral irradiances based on data from the Ozone Monitoring Instrument at solar noon in Southern Amazonas, Brazil. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, **37**, 101423. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2024.101423>
- Aragão, L. E., et al., 2008. Interactions between rainfall, deforestation and fires during recent years in the Brazilian Amazonia. *Phil. Trans. R. Soc. B*, **363**, 1779–1785. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.0026>
- Aragão, L. O., et al., 2018. 21st Century drought-related fires counteract the decline of Amazon deforestation carbon emissions. *Nature Communications*, **9**, 536. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02771-y>
- Arruda, N. M., et al., 2018. Desigualdade no acesso à saúde entre as áreas urbanas e rurais do Brasil: uma decomposição de fatores entre 1998 a 2008. *Cadernos de Saúde Pública*, **34**, e00213816. <https://doi.org/10.1590/0102-311X00213816>

- Artaxo, P., et al., 2013. Atmospheric aerosols in Amazonia and land use change: from natural biogenic to biomass burning conditions. *Faraday Discuss*, **165**, 203-235. <https://doi.org/10.1039/C3FD00052D>
- Bais, A. F., et al., 2019. Ozone–climate interactions and effects on solar ultraviolet radiation. *Photochemical & Photobiological Sciences*, **18**, 602–640. <https://doi.org/10.1039/C8PP90059K>
- Barcellos, C. C., et al., 2002. Organização espacial, saúde e qualidade de vida: análise espacial e uso de indicadores na avaliação de situações de saúde. *Informe Epidemiológico do SUS*, **11**, 129-138. <https://dx.doi.org/10.5123/S0104-16732002000300003>
- Benas, N., Meirink, J. F., Karlsson, K.-G., Stengel, M., & Stammes, P. (2020). Satellite observations of aerosols and clouds over southern China from 2006 to 2015: analysis of changes and possible interaction mechanisms. *Atmos. Chem. Phys.*, **20**, 457-474. <https://doi.org/10.5194/acp-20-457-2020>
- Bencherif, H. et al., 2024. Ozone Trend Analysis in Natal (5.4°S, 35.4°W, Brazil) Using Multi-Linear Regression and Empirical Decomposition Methods over 22 Years of Observations. *Remote Sensing*, **16**, 208. <https://doi.org/10.3390/rs16010208>
- Bernhard, G. H. et al., 2023. Stratospheric ozone, UV radiation, and climate interactions. *Photochemical & Photobiological Sciences*, **22**, 937–989. <https://doi.org/10.1007/s43630-023-00371-y>
- Biscaro, T. S., et al., 2021. What drives daily precipitation over the central Amazon? Differences observed between wet and dry seasons. *Atmos. Chem. Phys.*, **21**, 6735-6754. <https://doi.org/10.5194/acp-21-6735-2021>
- Bojilova, R., et al., 2022. Dependence of the Index of Biologically Active Ultraviolet Radiation on the Season and Time of Day. *Atmosphere*, **13**, 1455. <https://doi.org/10.3390/atmos13091455>
- Braveman, P., et al., 2011. The social determinants of health: coming of age. *Annual Review of Public Health*, **32**, 381–398. <https://doi.org/10.1146/annurev-publhealth-031210-101218>
- Breiman, L., 2001. Random forests. *Machine Learning*, **45**, 5–32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- Cabral, L. N., & Cândido, G. A., 2019. Urbanização, vulnerabilidade, resiliência: relações conceituais e compreensões de causa e efeito. *Rev Bras Gest Urbana*, **11**, e20180063. <https://doi.org/10.1590/2175-3369.011.002.AO08>
- Calbó, J., et al., 2005. Empirical studies of cloud effects on UV radiation: A review. *Reviews of Geophysics*, **43**, RG2002. <https://doi.org/10.1029/2004RG000155>
- Campanelli, M., et al., 2022. Aerosol optical characteristics in the urban area of Rome, Italy, and their impact on the UV index. *Atmos. Meas. Tech.*, **15**, 1171-1183. <https://doi.org/10.5194/amt-15-1171-2022>
- Carrapato, P., et al., 2017. Determinante da saúde no Brasil: a procura da equidade na saúde. *Saúde e Sociedade*. **26**, 676-689. <https://doi.org/10.1590/S0104-12902017170304>
- Carvalho, I. M. M., 2020. Segregação, vulnerabilidade e desigualdades sociais e urbanas. *Civitas: Rev. Ciênc. Soc.*, **20**, 270–86. <https://doi.org/10.15448/1984-7289.2020.2.28393>

- Ceballos, A. G. C. et al., 2014. Exposição solar ocupacional e câncer de pele não melanoma: estudo de revisão integrativa. *Revista Brasileira de Cancerologia*, **60**, 251–258. <https://doi.org/10.32635/2176-9745.RBC.2014v60n3.472>
- Ceccato, P. et al., 2021. Copernicus Global Land Products: Reviewing Process for High Quality Services. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS*, 6638–6641. <https://doi.org/10.1109/IGARSS47720.2021.9554936>
- Che, H., et al., 2015. Ground-based aerosol climatology of China: aerosol optical depths from the China Aerosol Remote Sensing Network (CARSNET) 2002–2013. *Atmos. Chem. Phys.*, **15**, 7619–7652. <https://doi.org/10.5194/acp-15-7619-2015>
- Cho, H. K., et al., 2000. Stratospheric ozone and surface UV radiation research and monitoring in Korea. *Atmospheric Ozone, Proc. Quadrennial Ozone Symp*, 287–288.
- Ciażyńska, M., et al., 2021. Ultraviolet Radiation and Chronic Inflammation—Molecules and Mechanisms Involved in Skin Carcinogenesis: A Narrative Review. *Life*, **11**, 326. <https://doi.org/10.3390/life11040326>
- Correia Filho, W. L., et al. 2024. Evaluation of the PM2.5 concentrations in South America: Climatological patterns and trend analysis. *Atmospheric Environment*, **338**, 120800. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2024.120800>
- Decancq, K., & Lugo, M. A., 2013. Weights in Multidimensional Indices of Wellbeing: An Overview. *Econometric Reviews*, **32**, 7–34. <https://doi.org/10.1080/07474938.2012.690641>
- Diffey BL., 1991. Solar ultraviolet radiation effects on biological systems. *Phys Med Biol.*, **36**, 299–328. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/36/3/001>
- Diffey, B. L., 2002. Sources and measurement of ultraviolet radiation. *Methods*, **28**, 4–13. [https://doi.org/10.1016/S1046-2023\(02\)00204-9](https://doi.org/10.1016/S1046-2023(02)00204-9)
- Duc, H. N., et al., 2021. Impact of biomass burnings in Southeast Asia on air quality and pollutant transport during the end of the 2019 dry season. *Environ Monit Assess*, **193**, 565. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09259-9>
- Dunn, O. J., 1964. Multiple Comparisons Using Rank Sums. *Technometrics*, **6**, 241–52. <https://doi.org/10.2307/1266041>
- Eleftheratos, K. et al., 2020. Possible effects of greenhouse gases to ozone profiles and DNA active UV-B irradiance at ground level. *Atmosphere*, **11**, 228. <https://doi.org/10.3390/atmos11030228>
- Eleftheratos, K., et al., 2015. Ozone and spectroradiometric UV changes in the past 20 years over high latitudes. *Atmosphere-Ocean*, **53**, 117–125. <https://doi.org/10.1080/07055900.2014.919897>
- Figueiredo, R., et al., 2020. Agricultural Impacts on Hydrobiogeochemical Cycling in the Amazon: Is There Any Solution? *Water*, **12**, 763. <https://doi.org/10.3390/w12030763>
- Fountoulakis, I. et al., 2021. Variability and trends in surface solar spectral ultraviolet irradiance in Italy: on the influence of geopotential height and lower-stratospheric ozone. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **21**, 18689–18705. <https://doi.org/10.5194/acp-21-18689-2021>

- França, R. R., & Mendonça, F., 2016. A pluviosidade na Amazônia meridional: variabilidade e teleconexões extra-regionais. *Confins. Revue franco-brésilienne de géographie/Revista franco-brasileira de geografia*, **29**. <https://doi.org/10.4000/confins.11580>
- Freitas, C. M., et al., 2014. Desastres naturais e saúde: uma análise da situação do Brasil. *Ciência & Saúde Coletiva*, **19**, 3645–3656. <https://doi.org/10.1590/1413-81232014199.00732014>
- Fu, R., et al., 2013. Increased dry-season length over southern Amazonia in recent decades and its implication for future climate projection. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, **110**, 18110-18115. <https://doi.org/10.1073/pnas.1302584110>
- Garnelo, L. et al., 2020. Barriers to access and organization of primary health care services for rural riverside populations in the Amazon. *International Journal for Equity in Health*, **19**, 1–14. <https://doi.org/10.1186/s12939-020-01171-x>
- Géron, A., 2019. *Hands-on machine learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow: Concepts, tools, and techniques to build intelligent systems* (2nd ed.). O'Reilly Media.
- Gies, P., et al., 2018. Review of the global solar UV index 2015 workshop report. *Health physics*, **114**, 84–90. <https://doi.org/10.1097/HP.0000000000000742>
- Häder, D.-P., & Cabrol, N. A., 2020. Monitoring of Solar Irradiance in the High Andes. *Photochemistry and Photobiology*, **96**, 1133-1139. <https://doi.org/10.1111/php.13276>
- Han, Y., et al., 2008. Construction and application of an assessment index system for evaluating the eco-community's sustainability. *Journal of Forestry Research*, **19**, 154–158. <https://doi.org/10.1007/s11676-008-0027-2>
- Herbert, R., & Stier, P., 2023. Satellite observations of smoke–cloud–radiation interactions over the Amazon rainforest. *Atmos. Chem. Phys.*, **23**, 4595-4616. <https://doi.org/10.5194/acp-23-4595-2023>
- Holick, M. F., 2020. Sunlight, UV Radiation, Vitamin D, and Skin Cancer: How Much Sunlight Do We Need?. *Adv. Exp. Med. Biol.*, **1268**, 19-36. https://doi.org/10.1007/978-3-030-46227-7_2
- Holm, S., 1979. A Simple Sequentially Rejective Multiple Test Procedure. *Scandinavian Journal of Statistics*, **6**, 65–70. JSTOR, <http://www.jstor.org/stable/4615733>. (Acessado em 28 maio de 2025).
- Hovila, J., et al., 2013. *OMI/Aura Surface UVB Irradiance and Erythema Dose Daily L3 Global Gridded 1.0 degree x 1.0 degree V3*. s.l.:s.n. <https://doi.org/10.5067/Aura/OMI/DATA3009>
- Hox, J. J., et al., 2017. *Multilevel analysis: Techniques and applications* (3rd ed.). Routledge.
- IBGE, 2022. *Cidades e estados do Brasil*. <https://cidades.ibge.gov.br/>. (Acessado em fevereiro de 2023).
- Inness, A. et al., 2019. The CAMS reanalysis of atmospheric composition. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **19**, 3515–3556. <https://doi.org/10.5194/acp-19-3515-2019>
- Iqbal, M., 1983. *An introduction to solar radiation*. Academic Press.

- Jebar, M. A., et al., 2020. Influence of clouds on OMI satellite total daily UVA exposure over a 12-year period at a southern hemisphere site. *International Journal of Remote Sensing*, **41**, 272–283. <https://doi.org/10.1080/01431161.2019.1641243>
- Kendall, M. G., 1948. *Rank correlation methods*. In: Public Program Analysis. Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-1-4684-6683-6_9
- Kerr, J.B., 1997. *Observed Dependencies of Atmospheric UV Radiation and Trends*. In: Zerefos, C.S., Bais, A.F. (eds) *Solar Ultraviolet Radiation*. NATO ASI Series, vol 52. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-03375-3_19
- Kim, J. E., et al., 2008. Determination of radiation amplification factor of atmospheric aerosol from the surface UV irradiance measurement at Gwangju, Korea. *Theoretical and applied climatology*, **91**, 217–228. <https://doi.org/10.1007/s00704-006-0285-x>
- Kim, J., et al., 2013. Effects of ozone and aerosol on surface UV radiation variability. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, **119**, 46–51. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2012.11.007>
- Kruskal, W. H., & Wallis, W. A., 1952. Use of Ranks in One-Criterion Variance Analysis. *Journal of the American Statistical Association*, **47**, 583–621. <https://doi.org/10.1080/01621459.1952.10483441>
- Krzyścin, J. W., et al., 1998. Seasonal acceleration of the rate of total ozone decreases over Central Europe: impact of tropopause height changes. *Journal of atmospheric and solar-terrestrial physics*, **60**, 1755–1762. [https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(98\)00149-7](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(98)00149-7)
- Kuhn, M., & Johnson, K., 2013. *Applied predictive modeling*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-6849-3>
- Kylling, A., et al., 1997. Transmittance of a cloud is wavelength-dependent in the UV-range: Physical interpretation. *Geophysical Research Letters*, **24**, 397–400. <https://doi.org/10.1029/97GL00111>
- Kylling, A., et al., 1998. Effect of aerosols on solar UV irradiances during the Photochemical Activity and Solar Ultraviolet Radiation campaign. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **103**, 26051–26060. <https://doi.org/10.1029/98JD02350>
- Lakkala, K., et al., 2017. 25 years of spectral UV measurements at Sodankylä. *AIP Conf. Proc*, **1810**, p. 110006. <https://doi.org/10.1063/1.4975568>
- Lee, H.-H., Iraqui, O., Gu, Y., Yim, S.-L., Chulakadabba, A., Tonks, A. Y.-M., . . . Wang, C. (2018). Impacts of air pollutants from fire and non-fire emissions on the regional air quality in Southeast Asia. *Atmos. Chem. Phys.*, **18**, 6141–6156. <https://doi.org/10.5194/acp-18-6141-2018>
- Lee, J. W., et al. 2020. Deciphering UV-induced DNA Damage Responses to Prevent and Treat Skin Cancer. *Photochemistry and Photobiology*, **96**, 478–499. <https://doi.org/10.1111/php.13245>
- Leite-Filho, A. T., et al., 2019. The southern Amazon rainy season: The role of deforestation and its interactions with large-scale mechanisms. *International Journal of Climatology*, **40**, 1–14. <https://doi.org/10.1002/joc.6335>

- Leite-Filho, A. T., et al., 2021. Deforestation reduces rainfall and agricultural revenues in the Brazilian Amazon. *Nature Communications*, **12**, 2591. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22840-7>
- Leiter, U., et al., 2020. *Epidemiology of Skin Cancer: Update 2019*. In: Reichrath, J. (eds) Sunlight, Vitamin D and Skin Cancer. Advances in Experimental Medicine and Biology, **1268**. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-46227-7_6
- Levelt, P. F. et al., 2006. The ozone monitoring instrument. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **44**, 1093-1101. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.872333>
- Leys, C., et al. 2013. Detecting outliers: Do not use standard deviation around the mean, use absolute deviation around the median. *Journal of Experimental Social Psychology*, **49**, 764–766. <https://doi.org/10.1016/j.jesp.2013.03.013>
- Li, Z., et al., 2016. Aerosol and monsoon climate interactions over Asia. *Reviews of Geophysics*, **54**, 866-929. <https://doi.org/10.1002/2015RG000500>
- Limberger, L. & Silva, M. E. S., 2016. Precipitação na bacia amazônica e sua associação à variabilidade da temperatura da superfície dos oceanos Pacífico e Atlântico: uma revisão. *GEOUSP Espaço e Tempo (Online)*, **20**, 657–675. <https://doi.org/10.11606/issn.2179-0892.geousp.2016.105393>
- Lindfors, A. & Arola, A., 2008. On the wavelength-dependent attenuation of UV radiation by clouds. *Geophysical research letters*, Volume **35**. <https://doi.org/10.1029/2007GL032571>
- Liou, K.-N. (2002). *An introduction to atmospheric radiation* (Vol. 84). Elsevier.
- Liu, S. C., et al., 1991. Effect of anthropogenic aerosols on biologically active ultraviolet radiation. *Geophysical Research Letters*, **18**, 2265–2268. <https://doi.org/10.1029/91GL02773>
- Lopo, A. B., et al., 2013. Ozone and aerosol influence on ultraviolet radiation on the east coast of the Brazilian Northeast. *Atmospheric and Climate Sciences*, **4**, 92-99. <http://dx.doi.org/10.4236/acs.2014.41012>
- Lundberg, S. M., & Lee, S.-I., 2017. A unified approach to interpreting model predictions. In *Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS'17)*. Curran Associates Inc., Red Hook, NY, USA, 4768–4777. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1705.07874>
- Lundberg, S. M., et al., 2020. From local explanations to global understanding with explainable AI for trees. *Nature Machine Intelligence*, **2**, 56-67. <https://doi.org/10.1038/s42256-019-0138-9>
- Machado , L., et al., 2021. How weather events modify aerosol particle size distributions in the Amazon boundary layer. **21**, 18065-18086. <https://doi.org/10.5194/acp-21-18065-2021>
- Mamun, A. A., & Alam, M., 2025. Promoting Equity in Public Health: Addressing Inequality and Social Disparities. *Health Science Reports*, **8**: e70821. <https://doi.org/10.1002/hsr2.70821>
- Mann, H. B., 1945. Nonparametric tests against trend. *Econometrica: Journal of the econometric society*, **13**, 245–259. <https://doi.org/10.2307/1907187>

- Martins, P. A. S. et al., 2023. Updating of the Köppen and Thornthwaite and Mather (1955) climate classification system for the Southern Amazonas. *Revista do Departamento de Geografia*, **43**, e191137. <http://dx.doi.org/10.11606/eISSN.2236-2878.rdg.2023.191137>
- Mayer, B., et al., 1998. Enhanced absorption of UV radiation due to multiple scattering in clouds: Experimental evidence and theoretical explanation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **103**, 31241–31254. <https://doi.org/10.1029/98JD02676>
- Mesquita, L. G. et al., 2020. Skin Cancer and Family Income: an Ecological Study. *Revista Brasileira de Cancerologia*, **66**, e-07949. <https://doi.org/10.32635/2176-9745.RBC.2020v66n4.949>
- Miguel, A., et al., 2011. Evolution of erythemal and total shortwave solar radiation in Valladolid, Spain: Effects of atmospheric factors. *Journal of atmospheric and solar-terrestrial physics*, Volume **73**, 578–586. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2010.11.021>
- Monken, M., & Barcellos, C., 2005. Vigilância em saúde e território utilizado: possibilidades teóricas e metodológicas. *Cadernos de Saúde Pública*, **21**, 898–906. <https://doi.org/10.1590/S0102-311X2005000300024>
- Morais, F. G., et al., 2022. Relationship between Land Use and Spatial Variability of Atmospheric Brown Carbon and Black Carbon Aerosols in Amazonia. *Atmosphere* , **13**, 1328. <https://doi.org/10.3390/atmos13081328>
- Moreira, G. A., et al., 2021. Influence of a Biomass-Burning Event in PM_{2.5} Concentration and Air Quality: A Case Study in the Metropolitan Area of São Paulo. *Sensors*, **21**, 425. <https://doi.org/10.3390/s21020425>
- Morgenstern, O., et al., 2008. The World Avoided by the Montreal Protocol. *Geophysical Research Letters*, **35**. <https://doi.org/10.1029/2008GL034590>
- Moshhammer, H., et al., 2016. UV “Indices”—What Do They Indicate? *Int. J. Environ. Res. Public Health*, **13**, 1041. <https://doi.org/10.3390/ijerph13101041>
- Muyimbwa, D., et al., 2015. Aerosol optical properties and precipitable water vapor column in the atmosphere of Norway. *Applied Optics*, **54**, 1505-1514. <https://doi.org/10.1364/AO.54.001505>
- Nascimento, J. P., et al., 2021. Aerosols from anthropogenic and biogenic sources and their interactions – modeling aerosol formation, optical properties, and impacts over the central Amazon basin. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **21**, 6755-6779. <https://doi.org/10.5194/acp-21-6755-2021>
- Nascimento Neto, P., & Ultramari, C.. (2022). Política habitacional no Brasil: manifestações territoriais de uma década de habitação social de mercado . *Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais*, **24**, e202206. <https://doi.org/10.22296/2317-1529.rbeur.202206>
- Neale, R. E., et al., 2023. The effects of exposure to solar radiation on human health. *Photochem Photobiol Sci*, **22**, 1011-1047. <https://doi.org/10.1007/s43630-023-00375-8>
- Norval, M., et al., 2011. The human health effects of ozone depletion and interactions with climate change. *Photochemical & Photobiological Sciences*, **10**, 199–225. <https://doi.org/10.1039/c0pp90044c>

- OECD/European Union/EC-JRC, 2008. *Handbook on Constructing Composite Indicators: Methodology and User Guide*. OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/9789264043466-en>
- Palácios, R. S., et al., 2020. Long Term Analysis of Optical and Radiative Properties of Aerosols in the Amazon Basin. *Aerosol and Air Quality Research*, **20**, 139-154. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2019.04.0189>
- Palácios, R., et al., 2022. Long-term measurements of aerosol optical properties and radiative forcing (2011-2017) over Central Amazonia. *Atmosfera*, **35**, 22. <https://doi.org/10.20937/atm.52892>
- Reis, G. C. G. et al., 2023. UV index seasonal variability in an Amazonian city of Brazil based on satellite data. *ciencia e natura*, **45**, e76670. <https://doi.org/10.5902/2179460X76670>
- Reis, B. M. R., et al., 2024. Desafios e caminhos para a equidade em saúde na atenção primária. *Revista Eletrônica Acervo Saúde*, **24**, e14473. <https://doi.org/10.25248/reas.e14473.2024>
- Ruiz-Vásquez, et al., 2020. Effects of Amazon basin deforestation on regional atmospheric circulation and water vapor transport towards tropical South America. *Clim Dyn*, **54**, 4169-4189. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05223-4>
- Saha, J., et al., 2022. Impact of the El Niño–Southern Oscillation on upper-tropospheric water vapor. *Atmospheric Research*, **280**, 106422. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106422>
- Sands, E., et al., 2024. Satellite-observed relationships between land cover, burned area, and atmospheric composition over the southern Amazon. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **24**, 11081-11102. <https://doi.org/10.5194/acp-24-11081-2024>
- Santana, J., et al., 2025. Biomass burning smoke transport and radiative impact over the city of Sao Paulo: An extreme event case study, *EGUsphere* [preprint]. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-9>
- Schulzweida, U., 2024. *CDO User Guide: Climate Data Operators* (Version 2.5.0). Max Planck Institute for Meteorology. <https://code.mpimet.mpg.de/projects/cdo/embedded/cdo.pdf>
- Sen, P. K., 1968. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American statistical association*, **63**, 1379–1389. <https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>
- Shi, L., et al., 2018. Assessing the Pattern Differences between Satellite-Observed Upper Tropospheric Humidity and Total Column Water Vapor during Major El Niño Events. *Remote Sens.*, **10**, 1188. <https://doi.org/10.3390/rs10081188>
- Silva Junior, C. L., et al., 2021. The Brazilian Amazon deforestation rate in 2020 is the greatest of the decade. *Nature Ecology & Evolution*, **5**, 144-145. <https://doi.org/10.1038/s41559-020-01368-x>
- Silva, A. A., 2011. Local cloud cover, ground-based and satellite measurements of erythral dose rate for an urban, tropical site in Southern Hemisphere. *Journal of atmospheric and solar-terrestrial physics*, **73**, 2474-2481. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2011.09.002>
- Silva, A. A. (2013). Erythral dose rate under noon overcast skies. *Photochemical & Photobiological Sciences*, **12**, 777-786. <https://doi.org/10.1039/c2pp25330e>

- Silva, L., et al., 2016. Exposição do trabalhador rural à radiação ultravioleta: estudo no sul de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Climatologia*, **18**. <https://doi.org/10.5380/abclima.v18i0.43651>
- Silveira, J. G., et al., 2022. Land Use, Land Cover Change and Sustainable Intensification of Agriculture and Livestock in the Amazon and the Atlantic Forest in Brazil. *Sustainability*, **14**, p. 2563. <https://doi.org/10.3390/su14052563>
- Sirithian, D., & Thanatrakolsri, P., 2022. Relationships between Meteorological and Particulate Matter Concentrations (PM2.5 and PM10) during the Haze Period in Urban and Rural Areas, Northern Thailand. *Air, Soil and Water Research*, **15**. <https://doi.org/10.1177/11786221221117264>
- Souza, C. T., et al., 2020. Ozone trends on equatorial and tropical regions of South America using Dobson spectrophotometer, TOMS and OMI satellites instruments. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, **203**, 105272. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105272>
- Stabile, M. C. C. et al., 2020. Solving Brazil's land use puzzle: Increasing production and slowing Amazon deforestation. *Land use policy*, **91**, 104362. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.104362>
- Tanskanen, A., Krotkov, N. A., Herman, J. R. & Arola, A., 2006. Surface ultraviolet irradiance from OMI. *IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **44**, 1267–1271. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2005.862203>
- Tian, W., et al., 2023. Role of Stratospheric Processes in Climate Change: Advances and Challenges. *Adv. Atmos. Sci.*, **40**, 1379-1400. <https://doi.org/10.1007/s00376-023-2341-1>
- Tiba, C., & Leal, S., 2017. Enhancement of UV Radiation by Cloud Effect in NE of Brazil. *International Journal of Photoenergy*, **2017**, 1-9. <https://doi.org/10.1155/2017/8107435>
- Tsekeri, A., et al., 2017. Profiling aerosol optical, microphysical and hygroscopic properties in ambient conditions by combining in situ and remote sensing. *Atmos. Meas. Tech.*, **10**, 83-107. <https://doi.org/10.5194/amt-10-83-2017>
- Vitt, R. et al., 2020. UV-Index climatology for Europe based on satellite data. *Atmosphere*, **11**, 727. <https://doi.org/10.3390/atmos11070727>
- Webb, A. R., et al., 2011. Know your standard: clarifying the CIE erythema action spectrum. *Photochemistry and photobiology*, **87**, 483–486. <https://doi.org/10.1111/j.1751-1097.2010.00871.x>
- WHO, 2025. *World report on social determinants of health equity*. World Health Organization.
- Xia, X., et al., 2008. Analysis of relationships between ultraviolet radiation (295–385 nm) and aerosols as well as shortwave radiation in North China Plain. *Annales Geophysicae*, **26**, 2043–2052. <https://doi.org/10.5194/angeo-26-2043-2008>
- Yin, S., et al., 2019. Influence of biomass burning on local air pollution in mainland Southeast Asia from 2001 to 2016. *Environmental Pollution*, **254**, 112949. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.07.117>
- Zanin, G. D., et al., 2022. Queima de biomassa no bioma Amazônia análise da injeção e dispersão de plumas de fumaça na atmosfera. *Revista do Departamento de Geografia*, **42**, e189114. <https://doi.org/10.11606/eISSN.2236-2878.rdg.2022.189114>

Zerefos, C., 1997. *Factors Influencing the Transmission of Solar Ultraviolet Irradiance through the Earth's Atmosphere*. In: Zerefos, C.S., Bais, A.F. (eds) *Solar Ultraviolet Radiation*. NATO ASI Series, vol 52. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-03375-3_9

6 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

Esta tese teve como objetivo descrever as variações sazonais, tendências e correlações da radiação ultravioleta solar e sua relação com a propensão ao câncer de pele no sul do Amazonas, com ênfase na Região Geográfica Imediata de Manicoré. Com base em dados de sensoriamento remoto e em um inquérito populacional domiciliar, foram analisadas variáveis de radiação ultravioleta e atmosféricas, os hábitos de exposição solar, os fototipos predominantes e os fatores de vulnerabilidade socioeconômica.

Os resultados confirmam o primeiro pressuposto do estudo: a radiação ultravioleta solar na região apresenta variações espaço-temporais bem definidas, particularmente, com índice UV persistente em níveis “muito altos” e “extremos” ao longo de todo o ano. A análise das irradiâncias em comprimentos de onda específicos (305, 310, 324 e 380 nm) evidenciou a influência direta do ângulo zenital solar e da cobertura de nuvens sobre a modulação da radiação UV. Foram detectadas tendências de aumento estatisticamente significativas para os comprimentos de onda associados à radiação UVA, em paralelo à redução da espessura óptica das nuvens, o que reforça a necessidade de atenção ao impacto cumulativo dessa radiação, mesmo em fototipos mais elevados.

O segundo pressuposto, relativo à baixa adesão às práticas de fotoproteção entre populações com fototipos mais elevados, foi igualmente confirmado. Embora esses indivíduos apresentem maior proteção natural contra os efeitos agudos da radiação UVB, os dados demonstraram alta frequência de exposição solar prolongada, aliada à baixa utilização de protetor solar, especialmente entre aqueles em situação de vulnerabilidade socioeconômica. Ressalta-se que, mesmo entre os que adotam medidas de proteção, a preferência por métodos alternativos (camisas, chapéus, óculos) reflete barreiras econômicas ao acesso ao filtro solar. Além disso, fototipos mais elevados permanecem suscetíveis a efeitos como hiperpigmentação induzida por UVA, reforçando a necessidade de campanhas educativas específicas para este grupo.

O terceiro pressuposto, que associa vulnerabilidade socioeconômica à menor adesão às práticas de fotoproteção, foi demonstrado estatisticamente. A Odds Ratio de 2,28 revelou que indivíduos em situação de vulnerabilidade socioeconômica têm mais que o dobro de chance de não aderirem às medidas preventivas. A carência de profissionais especializados, como dermatologistas, nos municípios analisados, somada à precariedade da infraestrutura de saúde e à

ausência de dados clínicos locais, contribui para um cenário de subnotificação e diagnóstico tardio dos casos de câncer de pele.

Adicionalmente, a tese reafirma que a ausência de marcadores clínicos, como a escala de Fitzpatrick, nos instrumentos censitários e de vigilância em saúde, limita a identificação de grupos suscetíveis aos efeitos nocivos do UV e compromete a formulação de políticas públicas eficazes. A integração desse tipo de classificação em levantamentos oficiais representa uma inovação metodológica com potencial de ampliar a precisão das ações preventivas.

A contribuição desta pesquisa é dupla: por um lado, avança na compreensão das dinâmicas atmosféricas que modulam a radiação UV na Amazônia, uma região historicamente desassistida em termos de monitoramento *in situ*; por outro, traz à luz as desigualdades sociais que moldam os comportamentos de risco frente à exposição solar. Com isso, propõe-se a ampliação de redes de diagnóstico precoce, a capacitação de profissionais da atenção básica para detecção de lesões suspeitas, e a implementação de políticas públicas adaptadas ao contexto amazônico, com fornecimento gratuito de produtos fotoprotetores a populações vulneráveis.

Os achados aqui apresentados oferecem subsídios técnicos e científicos relevantes para o fortalecimento de políticas de saúde pública, educação ambiental e planejamento territorial na Amazônia e em outras regiões com condições similares.

Por fim, recomenda-se que futuros estudos:

- Integrem abordagens de validação de dados satelitais com medições em superfície, aprofundem a análise de variáveis atmosféricas emergentes e explorem os impactos das mudanças climáticas sobre a incidência da radiação UV;
- Avaliem a eficácia de campanhas de educação em saúde e distribuição gratuita de fotoprotetores em comunidades ribeirinhas, rurais e urbanas da Amazônia;
- Estudem o impacto das mudanças no uso e cobertura da terra (ex.: desmatamento, queimadas e urbanização) sobre a transmissão da radiação UV em áreas de transição ecológica;
- Proponham modelos de vigilância epidemiológica para câncer de pele em áreas remotas, com uso de tecnologias móveis, capacitação da atenção primária e uso de escalas clínicas como a de Fitzpatrick;

- Estabeleçam metodologias para estimar a carga de doença associada à radiação UV em regiões com subnotificação, considerando anos de vida perdidos e custos ao sistema de saúde.

CONTRIBUIÇÕES CIENTÍFICAS

Artigos completos publicados em periódicos

- Alves, Pericles V.; SANTOS, L. O. F. dos ; Costa, R. L. da ; PEDREIRA JUNIOR, A. L. ; Bourscheidt, V. ; ARAUJO, J. C. L. ; DUPAS, F. A. . (In)Effectiveness of Permanent Preservation Areas in Controlling Deforestation in the Amazon: A Case Study of the Matinguari National Park, Brazil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 2025.
- Alves, P. V.; Bourscheidt, V., et al. Seasonal variations and trends in solar UV spectral irradiances based on data from the Ozone Monitoring Instrument at solar noon in Southern Amazonas, Brazil. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 37, p. 101423, 2025.
- Melo P. R. H.; Alves, P. V.; Camargo, T. S. Integração de Conhecimentos de Ensino de Ciências Naturais Para uma Educação em Saúde Planetária: Estudo em uma Comunidade Ribeirinha da Amazônia. **Revista Brasileira de Pesquisa em Educação Em Ciências**, v. 24, p. e52805-22, 2024.
- Melo, P. R. H.; Alves, P. V.; Camargo, T. S. Biodiversity or ultra-processed food: an analysis of school meals offered in a riverside school in the Brazilian Amazon. **Lancet Planetary Health**, v. 8, p. S14, 2024.
- Melo P. R. H.; Alves, P. V.; Bourscheidt, V.; Camargo, T. S. Planetary Health Education: Exploring Students Perceptions of Climate Change in a School in Southern Amazonas. **Challenges**, v. 15, p. 1-18, 2024.
- Alves, P. V.; Bourscheidt, V., et al. Propriedades térmicas do solo: estudo de caso em uma região do semiárido alagoano no nordeste brasileiro. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 17, p. 2684-2694, 2024.
- Martins, P. A. S.; Querino, C. A. S.; Querino, J. K. A.; ...; Alves, P. V; et al. Precipitação, temperatura do ar e balanço hídrico climatológico para Humaitá, Amazonas, Brasil. **Contribuciones a las Ciencias Sociales**, v. 17, p. e7665, 2024.
- Oliveira, H. M.; Querino, J. K. A.; Alves, P. V.; et al. Avaliação dos efeitos da arborização nas variáveis de temperatura e umidade relativa do ar na cidade de Manicoré, Amazonas, Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 32, p. 292-310, 2023.
- Melo, P. R. H.; Alves, P. V.; et al. Investigating the Possible Socio-Environmental Impacts Arising from the Habits of Riverside Students in the Context of The Brazilian Amazon: A Look At Planetary Health. **RGSA (ANPAD)**, v. 18, p. e04277, 2023.
- Melo P. R. H.; Alves, P. V.; Camargo, T. S. Planetary Health Initiatives in Rural Education at a Riverside School in Southern Amazonas, Brazil. **Challenges**, v. 14, p. 50, 2023.
- Alves, P. V.; et al. Sazonalidade anual e a variabilidade horária mensal do índice ultravioleta para a cidade de Humaitá, Amazonas, Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 30, p. 506-523, 2022.
- Rohleder, L. A. S.; Querino, C. A. S.; Alves, P. V. et al. Avaliação de parâmetros ambientais em uma microrregião no sul do estado do Amazonas e suas relações com estresse térmico de bovinos leiteiros. **Ciência Animal Brasileira**, v. 23, p. 1-8, 2022.

Alves, P. V.; et al. A importância do conceito da radiação solar na educação básica: a percepção de alunos do ensino médio sobre a temática. **Revista Brasileira de Ensino de Física** (ONLINE), v. 43, p. e20210054, 2021.

Capítulos de livros publicados

- Alves, V. C. M. ; Barbosa, N. A. B. ; Moreira, M. A. ; Schweickardt, J. C. ; Alves, P. V. ; de Paula, R. T. A. . “Retratos” da saúde ribeirinha pelo olhar da equipe da Unidade Básica de Saúde Fluvial. In: Maria Adriana Moreira, Sônia Maria Lemos, Vanessa Colares Magalhães Alves e Júlio Cesar Schweickardt. (Org.). *Amanhã será um novo dia: SUS presente nos territórios e na vida de Manicoré, AM*. 1ed.Porto Alegre, RS: Editora Rede Unida, 2024, v. 29, p. 1-364.
- Alves, P. V.; SANTOS, L. O. F.; Pedreira Junior, A. L.; Querino, C. A. S.; Bourscheidt, V. . Análise das emissões de dióxido de carbono (CO₂) para a cidade de Porto velho, Rondônia, Brasil. In: Americo Junior Nunes da Silva; André Ricardo Lucas Vieira. (Org.). *Análise das emissões de dióxido de carbono (CO₂) para a cidade de Porto velho, Rondônia, Brasil*. 1ed.Ponta Grossa - Paraná - Brasil: Atena Editora, 2022, v. 1, p. 71-84.
- Lustosa, V. S.; Querino, C. A. S.; Moura, M. A. L.; Alves, P. V.; et al. Comparação da transmitância da radiação solar global (RG) entre anos seco e chuvoso em uma floresta de mata atlântica. In: Americo Junior Nunes da Silva; André Ricardo Lucas Vieira. (Org.). *Comparação da transmitância da radiação solar global (RG) entre anos seco e chuvoso em uma floresta de mata atlântica*. 1ed.Ponta Grossa - Paraná - Brasil: Atena Editora, 2022, v. 1, p. 21-30.

Trabalhos completos publicados em anais de congressos

- Melo, P. R. H.; Camargo, T. S.; Alves, P. V.; et al. Mudanças Climáticas: abordando conceitos e relações para uma Educação em Saúde Planetária. In: XIV Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências, 2023, Caldas Novas. *Anais do XIV Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências*. Campina Grande: Realize Editora, 2023.
- Alves, P. V.; Santos, L. O. F.; Pedreira Junior, A. L.; C. A. S. Querino; Bourscheidt, V. Emissões totais de dióxido de carbono (CO₂) para a cidade de Porto Velho, Rondônia, Brasil. In: XXI Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2021, Campina Grande. *Meteorologia, Sociedade e Futuro*, 2021.
- Lustosa, V. S.; Moura, M. A. L.; Querino, J. K. A. S.; Querino, C. A. S.; Alves, P. V. Atenuação da radiação solar global (RG) pelo dossel da floresta de mata atlântica em ano seco e chuvoso no estado de Alagoas. In: XXI Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2021, Campina Grande. *Meteorologia, Sociedade e Futuro*, 2021.
- Rohleder, L. A. S.; Alves, P. V.; et al. Conforto térmico de bovinos leiteiros através do índice de temperatura e umidade em Humaitá-AM. In: XXI Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2021, Campina Grande. *Meteorologia, Sociedade e Futuro*, 2021.
- Oliveira, H. M.; Vaz, M. A. B.; Querino, J. K. A. S.; Querino, C. A. S.; Alves, P. V. Caracterização do índice de conforto térmico humano (ICH) na orla da cidade de Humaitá/AM. In: XXI

Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2021, Campina Grande. Meteorologia, Sociedade e Futuro, 2021.

Resumos expandidos publicados em anais de congressos

- Ponce, A. P. S.; Alves, P. V.; Pedreira Junior, A. L.; Santos, L. O. F.; Bourscheidt, V.; Costa, R. L. da. Variabilidade das emissões de dióxido de carbono (CO₂) em Lábrea, Amazonas, Brasil. In: VII Jornada de Gestão e Análise Ambiental, 2023, São Carlos. Emergência Climática: o futuro é agora. São Carlos, 2022. v. 7. p. 1-225.
- Lobato, K. B. M.; Alves, P. V.; Pedreira Junior, A. L.; Santos, L. O. F.; C. A. S. Querino; Bourscheidt, V. Emissões de dióxido de carbono (CO₂) em Humaitá, Amazonas, Brasil. In: VII Jornada de Gestão e Análise Ambiental, 2023, SAO CARLOS. Emergência Climática: o futuro é agora. São Carlos, 2022. v. 7. p. 1-225.
- Alves, P. V.; Querino, C. A. S.; Moura, M. A. L.; Martins, P. A. S.; Feitosa Junior, A. A.; Bourscheidt, V. Estimativas da radiação solar ultravioleta biologicamente ativa. In: VII Jornada de Gestão e Análise Ambiental, 2023, SAO CARLOS. Emergência Climática: o futuro é agora. São Carlos, 2022. v. 7. p. 1-225.
- Feitosa Junior, A. A.; Rohleder, L. A. S.; Alves, P. V.; et al. Previsibilidade através de redes neurais artificiais das cotas máximas mensais do rio madeira no sudoeste da Amazônia. In: VII Jornada de Gestão e Análise Ambiental, 2023, SAO CARLOS. Emergência Climática: o futuro é agora. SAO CARLOS, 2022. v. 7. p. 1-225.
- Martins, P. A. S.; Nunes, D. D.; Querino, C. A. S.; Alves, P. V.; et al. Balanço hídrico climatológico pelo método de Thornthwaite e Mather (1955) para a cidade de Manaus-AM. In: VII Jornada de Gestão e Análise Ambiental, 2023, São Carlos. Emergência Climática: o futuro é agora, 2022. v. 7. p. 1-225.

Demais tipos de produção técnica

- Alves, P. V.. Minicurso: Radiação UV na Amazônia: explorando os produtos da NASA através da linguagem Python. Evento: 20ª Semana Nacional de Ciência e Tecnologia. 2023. (Curso de curta duração ministrado/Outra).
- Alves, P. V.. Palestra: Desafios e oportunidades: radiação UV na Amazônia e seu impacto no desenvolvimento sustentável. Evento: 20ª Semana Nacional de Ciência e Tecnologia. 2023. (Curso de curta duração ministrado/Outra).
- Alves, P. V.. Minicurso: Noções básicas sobre LaTeX para a produção de textos científicos, I Simpósio de Agronomia no Vale do Rio Madeira: Agricultura voltada para o crescimento e desenvolvimento social. 2023. (Curso de curta duração ministrado/Outra).
- Alves, P. V.. Palestra: Efeitos da radiação UV em plantas e pessoas, I Simpósio de Agronomia no Vale do Rio Madeira: Agricultura voltada para o crescimento e desenvolvimento social. 2023. (Curso de curta duração ministrado/Outra).

- Alves, P. V.. Comitê Científico do I Simpósio de Agronomia no Vale do Rio Madeira: Agricultura voltada para o crescimento e desenvolvimento social. 2023. (Curso de curta duração ministrado/Outra).
- Alves, P. V.. Palestra: A importância do conceito da radiação solar na educação básica, Ciclo de palestras “Popularização da Ciência”. 2022. (Curso de curta duração ministrado/Outra).
- Alves, P. V.. Minicurso: Introdução básica à formatação de textos em LaTeX, V Congresso de Física e Matemática (CONFISMAT),. 2021. (Curso de curta duração ministrado/Outra).