



Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

– DOUTORADO –

**OBSTRUÇÃO DO CÉU E RADIAÇÃO UV:
CRITÉRIOS PARA A GERAÇÃO DE ESPAÇOS URBANOS
SAUDÁVEIS**

Por

Lilianne de Queiroz Leal

*Tese de Doutorado apresentada à Universidade Federal da Paraíba para
obtenção do grau de Doutor*

João Pessoa – Paraíba

Junho de 2024



Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

– DOUTORADO –

**OBSTRUÇÃO DO CÉU E RADIAÇÃO UV:
CRITÉRIOS PARA A GERAÇÃO DE ESPAÇOS URBANOS
SAUDÁVEIS**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor.

Lilianne de Queiroz Leal

Orientadora: Prof. Dr. Solange Maria Leder

João Pessoa – Paraíba

Junho de 2024



PPGECAM
Programa de Pós-Graduação
Engenharia Civil e Ambiental
UFPB Universidade Federal da Paraíba
Mestrado e Doutorado



**OBSTRUÇÃO DO CÉU E RADIAÇÃO UV: CRITÉRIOS PARA A GERAÇÃO DE
ESPAÇOS URBANOS SAUDÁVEIS**

LILIANNE DE QUEIROZ LEAL

Tese aprovada em 27 de março de 2024.

Período Letivo: 2023.2



Documento assinado digitalmente

SOLANGE MARIA LEDER

Data: 13/06/2024 15:27:40-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof(a). Dr(a). Solange Maria Leder – UFPB

Orientadora

Documento assinado digitalmente



VICTOR HUGO RABELO COELHO

Data: 25/06/2024 08:10:04-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof(a). Dr(a). Victor Hugo Rabelo Coelho – UFPB

Examinador Interno

Documento assinado digitalmente



LUIZ BUENO DA SILVA

Data: 25/06/2024 12:16:19-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof(a). Dr(a). Luiz Bueno da Silva – UFPB

Examinador Interno

Documento assinado digitalmente



ALDOMAR PEDRINI

Data: 17/06/2024 10:56:04-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof(a). Dr(a). Aldomar Pedrini – UFRN

Examinador Externo

Documento assinado digitalmente

Pedro Augusto Breda Fontão



PEDRO AUGUSTO BREDA FONTAÑO

Data: 23/07/2024 20:33:29-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof(a). Dr(a). Pedro Augusto Breda Fontão – UFPR

Examinador Externo

João Pessoa/PB

2024

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

L435o Leal, Lilianne de Queiroz.

Obstrução do céu e radiação UV : critérios para a
geração de espaços urbanos saudáveis / Lilianne de
Queiroz Leal. - João Pessoa, 2024.

168 f. : il.

Orientação: Solange Maria Leder.

Tese (Doutorado) - UFPB/CT.

1. Espaços urbanos - Radiação ultravioleta. 2.
Espaços urbanos - Sombra urbana. 3. Urbanização -
Obstrução do céu. I. Leder, Solange Maria. II. Título.

UFPB/BC

CDU 711.41:613.165(043)

*À memória do meu querido pai, **Luciano**,
dedico a conquista deste doutoramento.
Tenho certeza de que ele sempre estará do
meu lado em espírito. Sua falta é
imensurável.*

AGRADECIMENTOS

Por muitas vezes pensei que esse momento não chegaria. Tenho certeza de que não teria sido capaz de concluir esta tese se não fosse o amor, a força, a amizade e a confiança de pessoas tão especiais na minha vida.

A **DEUS**, sempre e por tudo.

À minha amada **MÃE** Vilani, pelo amor incondicional, por ser meu exemplo de docente, pelo estímulo à educação e à qualificação profissional. Ao meu **PAI** Luciano (*in memoriam*), por ter sido inspiração para ingressar na área da construção civil. Mesmo em seu momento delicado, lutando pela vida, me deu forças para confiar em mim e acreditar que tudo isso seria possível.

Às minhas duas **IRMÃS** Vivianne e Luciana, que são a minha **força motriz**: agradeço por serem meu espelho, por dedicarem seu tempo para me auxiliar técnica e psicologicamente, além da escuta e da grande parceria em minha vida.

Ao meu companheiro, Anderson, pela paciência, ajuda na realização das medições e compreensão nos momentos difíceis.

À minha **ORIENTADORA** (desde 2011), Professora Solange Leder, pela compreensão, amizade, parceria e por ter me dado direcionamento para o desenvolvimento desta tese.

Aos **PROFESSORES** Aldomar Pedrini e Francisco Lampadinha, junto à equipe do INPE, pelas orientações e auxílio na realização das medições.

Aos **AMIGOS** do laboratório LABCON, pela acolhida, conhecimentos compartilhados e amizade durante os anos dedicados ao doutoramento.

À **UFCG**, a instituição que escolhi trabalhar, por ter me concedido afastamento das atividades da docência para capacitação, o que possibilitou a realização desta pesquisa e ainda aos meus colegas de trabalho pela compreensão durante a minha fase ausente.

Enfim, a todos que contribuíram direta ou indiretamente na elaboração deste trabalho, meu sincero agradecimento.

OBSTRUÇÃO DO CÉU E RADIAÇÃO UV: Critérios para a geração de espaços urbanos saudáveis.

Lilianne de Queiroz Leal

Orientadora: Profa. Dra. Solange Maria Leder

RESUMO

A radiação ultravioleta desempenha um papel fundamental na saúde humana, com efeitos benéficos, como a síntese de vitamina D pela exposição moderada, e efeitos deletérios, como eritema e câncer de pele causados pela exposição excessiva. Diante da falta de um consenso global, a adoção de novas estruturas regulatórias de planejamento urbano é necessária, especialmente as que promovam o acesso solar. A rápida urbanização representa um desafio para a criação e manutenção de espaços urbanos com acesso solar, sobretudo pelas obstruções que reduzem a disponibilidade de céu. As sombras urbanas podem ser consideradas uma alternativa para melhoria da qualidade desses espaços, porém o excesso de sombreamento impede a ação profilática e outros benefícios do sol. Assim, esta pesquisa investigou a interação entre obstruções de céu e radiação solar ultravioleta (UV), estabelecendo critérios para a geração de espaços urbanos saudáveis em regiões de baixa latitude. Os estudos experimentais destacaram levantamentos e medições de Índice UV (IUV) e radiação UV em recortes urbanos localizados na cidade de João Pessoa/PB. As estações de medição foram compostas por duas áreas abertas e desobstruídas (Estação Sol) e seis áreas sombreadas por árvores e edifícios (Estação Sombra). Para avaliar a disponibilidade de céu, foram aplicados três indicadores de morfologia urbana: *Sky View Factor*, *Sun Coverage Factor* e Fator de Céu segmentado. Para as medições de radiação UV, foi adotada uma solução de baixo custo, com a intercomparação entre instrumentos, sendo utilizado o Confortímetro Senu (baixo custo) e o radiômetro *Ground Ultraviolet* – GUV (equipamento de referência). Modelos polinomiais mostraram-se satisfatórios, com boa adequação dos resíduos, especialmente entre os IUV. Os resultados indicaram que o IUV atingiu valores máximos de extremo risco acima de 11, sendo margens propensas a efeitos deletérios. Houve uma maior associação horária do IUV com a radiação global em comparação com outras faixas temporais. Estações com uma fração de céu acima de 0,40 registraram altos níveis de radiação UV com maior probabilidade de síntese D antes das 10h, enquanto aquelas abaixo de 0,10, apresentaram maior atenuação aos raios UV a ponto de não contribuir para o aumento do status da vitamina D. Verificou-se que há possibilidade de síntese de vitamina D em áreas parcialmente bloqueadas com fator de céu acima de 0,20, sob céu claro, em horários próximos ao meio-dia solar. A pesquisa ressaltou a importância das características morfológicas dos espaços urbanos na regulação da exposição à radiação UV, destacando os benefícios potenciais das áreas verdes sombreadas para a síntese de vitamina D. Isso sugere a implementação de políticas públicas de planejamento urbano para a criação de espaços verdes de qualidade e para construção de comunidades mais resilientes e saudáveis.

PALAVRAS-CHAVE: Obstrução do céu, Sombra Urbana, Radiação UV, Salubridade.

**SKY OBSTRUCTIONS AND UV RADIATION:
Criteria for generation healthy urban spaces**

Lilianne de Queiroz Leal

Supervisor: Profa. Dra. Solange Maria Leder

ABSTRACT

Ultraviolet radiation plays a key role in human health, with beneficial effects such as vitamin D synthesis from moderate exposure and detrimental effects such as erythema and skin cancer caused by excessive exposure. In the face of the lack of a global consensus, the adoption of new urban planning regulatory frameworks is needed, especially those that promote solar access. Rapid urbanization represents a challenge for the creation and maintenance of urban spaces with solar access, especially due to obstructions that reduce the availability of the sky. Depending on the degree of obstruction, urban shadows can be considered an alternative to improve the quality of these spaces. Thus, this research investigated the interaction between sky obstructions and solar ultraviolet (UV) radiation, establishing criteria for the generation of healthy urban spaces in low-latitude regions. The experimental studies highlighted surveys and measurements of UV Index (UVI) and UV radiation in urban areas located in the city of João Pessoa/PB. The measuring stations were composed of two open and unobstructed areas (Sun Station) and six areas shaded by trees and buildings (Shade Station). Three indicators of urban morphology were applied to evaluate the sky obstructions: Sky View Factor, Sun Coverage Factor, and Segmented Sky Factor. For the UV radiation measurements, the low-cost solution was adopted, with the intercomparison between instruments, using the Senu Comfort Meter and the Ground Ultraviolet Radiometer - GUV. Polynomial models were satisfactory, with good adequacy of the residuals, especially among the UVIs. Results indicated that the UVI reached maximum values of extreme risk above 11, with margins prone to deleterious effects. There was a greater hourly association of UVI with global radiation than time ranges. Sky fraction above 0.40 recorded high levels of UV radiation with a higher probability of D synthesis before 10 a.m., while those below 0.10 showed greater attenuation to UV rays to the point of not contributing to the increase in vitamin D status. Under clear skies, close to solar noon. The research highlighted the importance of the morphological characteristics of urban spaces in the regulation of exposure to UV radiation, highlighting the potential benefits of shaded green areas for the synthesis of vitamin D. This suggests the implementation of public urban planning policies for the creation of quality green spaces and the construction of more resilient and healthy community.

KEYWORDS: *Sky Obstruction, Urban shade, UV radiation, Salubrity.*

SUMÁRIO

RESUMO

ABSTRACT

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

1. INTRODUÇÃO	21
4.1 JUSTIFICATIVA	26
4.2 OBJETIVOS.....	28
4.3 ESTRUTURA DA TESE	29
2. REFERENCIAL TEÓRICO	32
2.1. ESPAÇOS URBANOS SAUDÁVEIS	33
2.2. EXPOSIÇÃO SOLAR E SALUBRIDADE.....	36
2.3. DIREITO AO SOL E O MEIO URBANO: ÍNDICADORES E MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA OBSTRUÇÃO DO CÉU	45
3. METODOLOGIA.....	58
3.1. ETAPA 1 - DEFINIÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO	60
3.2. ETAPA 2 - ÍNDICE ULTRAVIOLETA (IUV) EM JOÃO PESSOA/PB PARA CÉU DESOBSTRUÍDO	62
3.2.1. <i>Instrumento de medição de campo – Davis Vantage Pro2</i>	62
3.2.2. <i>Descrição da medição de campo – Índice Ultravioleta</i>	63

3.3.	ETAPA 3 - RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA EM JOÃO PESSOA/PB PARA CÉU OBSTRUÍDO	65
3.3.1.	<i>Instrumento de medição de campo – Confortímetro SENSU e radiômetro GUV ML8511 (Equipamento referência – INPE)</i>	65
3.3.2.	<i>Descrição da medição de campo – Radiação ultravioleta</i>	69
3.4.	ETAPA 4 - PROPOSTA DE INDICADOR DE OBSTRUÇÃO DO CÉU	72
3.4.1.	<i>Registros de imagens hemisféricas</i>	74
3.4.2.	<i>Subdivisão das imagens e sobreposição da máscara de sombra</i>	74
3.4.3.	<i>Simulação da obstrução do céu – Software Rayman</i>	76
3.4.4.	<i>Classificação da obstrução – Fator de Céu segmentado (FCs)</i>	77
3.5.	ETAPA 5 - PROCEDIMENTOS ESTATÍSTICOS PARA ANÁLISE DOS DADOS.....	78
3.5.1.	<i>Relação entre Radiação Global e Índice Ultravioleta (IUV)</i>	79
3.5.2.	<i>Comparativo entre instrumentos de medição – SENSU versus GUV (Equipamento referência – INPE)</i>	80
3.5.3.	<i>Magnitude da radiação UV nas estações de medição</i>	83
3.5.4.	<i>Predição de síntese de vitamina D</i>	84
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	88
4.1.	AVALIAÇÃO DO ÍNDICE ULTRAVIOLETA E SUA RELAÇÃO COM A RADIAÇÃO GLOBAL EM JOÃO PESSOA/PB	88
4.1.1.	<i>Relação anual e sazonal entre Radiação Global e Índice UV</i>	92
4.1.2.	<i>Relação diária e mensal entre Radiação Global e Índice UV</i>	96

4.2.	INTERCOMPARAÇÃO ENTRE INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO: SENSU <i>VERSUS</i> GUV (EQUIPAMENTO REFERÊNCIA – INPE)	99
4.2.1.	<i>Índice UV SENSU versus Índice UV GUV</i>	101
4.2.2.	<i>UV SENSU versus UVA GUV</i>	105
4.2.3.	<i>UV SENSU versus UVB GUV</i>	106
4.3.	CARACTERIZAÇÃO DE RECORTES URBANOS COM CÉU OBSTRUÍDO NA CIDADE DE JOÃO PESSOA/PB.....	109
4.4.	OBSTRUÇÃO DO CÉU E MAGNITUDE DA RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA EM ÁREAS URBANAS.....	116
4.5.	PREDIÇÃO DE SÍNTESE DE VITAMINA D NO MEIO URBANO: ESTUDO EM ÁREAS SOMBREADAS E DESOBSTRUÍDAS	129
4.5.1.	<i>Regressão logística para predição de síntese de vitamina D em áreas abertas (Estações Sol): Modelo 1</i>	131
4.5.2.	<i>Regressão logística para predição de síntese de vitamina D em áreas sombreadas (Estações Sombra): Modelo 2</i>	133
5.	CONCLUSÃO	147
5.1.	LIMITAÇÕES DA PESQUISA	149
5.2.	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	150
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	153

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ação espectral para produção de vitamina D e formação de eritema. (Fonte: Adaptado de Youl; Janda; Kimlin, 2009).....	22
Figura 2 – Fluxograma com etapas da pesquisa realizadas na tese.	30
Figura 3 – Mecanismo de ação verde com sombreamento urbano e impactos na saúde frente as mudanças climáticas (Fonte: Traduzido e adaptado de Knight <i>et al.</i> (2016)).	34
Figura 4 - Definição dos fototipos: (a) pele constitutiva, (b) 24h e (c) 7 dias após exposição solar. (Fonte: Adaptada de Fitzpatrick (1988)).	42
Figura 5 – Esquema de Solar Bounding Box. (Fonte: Raboudi; Saci, 2013).....	48
Figura 6 – Etapas de construção do RSB Envelope. (Fonte: Vartholomaios, 2015).....	49
Figura 7 – Construção do Solar Volume. (Fonte: Capuleto; Shaviv, 1999; Capeluto; Plotnikov, 2017)	50
Figura 8 – Etapas de construção do Reverse Solar Envelope.....	50
Figura 9 – (a) Imagem hemisférica; (b) Conversão em pixel 0 e 255; (c) Inserção de 36 anéis concêntricos. (Fonte: Adaptado de Middel <i>et al.</i> ,2017)	52
Figura 10 – (a) Máscara de sombra - SVF; e (b) Máscara solar – SCF e sobreposição da carta solar de João Pessoa/PB; (c) Definição do uVSF; (d) SVF direcional. Fonte: Lan; Gou; Xie (2021); Yi; Kim (2017); Musselman <i>et al.</i> (2012).....	54
Figura 11 – (a) Modelo Digital de Elevação (MDE) e (b) Modelo Digital do Terreno (MDT). (Fonte: (a) Redweik; Catita; Brito (2013) e (b) Machete <i>et al.</i> (2018))	55
Figura 12 – <i>Sky Exposure Factor</i> em tipologias distintas: (a) Barcelona, (b) Paris, (c) Amsterdã e (d) Singapura. (Fonte: Zhang <i>et al.</i> , 2012).....	56
Figura 13 – Descrição das etapas da metodologia.....	59

Figura 14 – Mapa de localização: João Pessoa (PB) e os bairros de (a) Jardim Oceania, (b) Manaíra e (c) Costa do Sol.	60
Figura 15 – Delimitação dos bairros de (a) Manaíra e (b) Jardim Oceania, e destaque para os recortes urbanos investigados. Fonte: Adaptado de Google (2023).	61
Figura 16 – Console de estação meteorológica e resposta relativa da Davis Vantage Pro2	63
Figura 17 – Localização do recorte para medição de campo – Nuppa/UFPB.	64
Figura 18 – (a) Confortímetro SENSU; (b) Placa do ML8511; (c) Curva de sensibilidade espectral do Sensor ML8511. Fonte: (LAPIS, 2013)	65
Figura 19 – (a) Intensidade UV versus Voltagem de saída; (b) Função espectral da CIE para queimaduras solares. Fonte: (LAPIS, 2013; LAPIS; ROHM, 2013)	66
Figura 20 – (a) Equipamentos de medição instalados no INPE e (b) Visualizador do software Logger. Fonte: Acervo da autora e Papandrea <i>et al.</i> (2021).	68
Figura 21 – Localização do recorte para medição de campo – Praça Silvio Porto	69
Figura 22 – Localização do recorte para medição de campo – Parque Parahyba 2	70
Figura 23 – Estação Sol (a) e Estação Sombra (b); (c) Localização do equipamento de medição SENSU; e (d) Detalhe da instalação do sensor.	71
Figura 24 – Esquema utilizado para determinação do Fator de Céu segmentado (FCs).....	73
Figura 25 – (a) Câmera Nikon; (b) Imagem hemisférica.	74
Figura 26 – Alguns exemplos de diferentes técnicas de subdivisão de céu. (Fonte: Adaptado de www.andrewmarsh.com)	75
Figura 27 – (a) Máscara de sombras; (b) Subdivisão da imagem em segmentos; (c) Sobreposição da máscara de sombra e dos segmentos.	75
Figura 28 – (a) Máscara de sombras de toda a abóbada e (b) Imagem da fração de céu inseridas no Rayman. (Fonte: Matzarakis, 2018)	76

Figura 29 - (a) Sobreposição da máscara de sombras; (b) Diagrama de obstrução e (c) Diagrama de obstrução com a trajetória aparente do sol referente à localização geográfica de João Pessoa/PB.	77
Figura 30 – (a) Plataforma Anaconda Navigator e (b) Interface JupyterLab – Console (A), Editor (B) e Ajuda (C)	78
Figura 31 – Distribuição dos dados de radiação global e Índice UV – variação horária	88
Figura 32 – Boxplot da radiação global e Índice UV – variação horária	89
Figura 33 – Boxplot da radiação global e Índice UV– variação mensal	90
Figura 34 – Distribuição dos dados de radiação Global e Índice UV por estação do ano ..	91
Figura 35 – Distribuição dos dados de radiação Global e Índice UV por médias diárias ...	92
Figura 36 – Modelo de regressão linear entre radiação global e Índice UV – dados horários	92
Figura 37 – Modelo de regressão entre radiação global e Índice UV - (a) verão e (b) primavera	94
Figura 38 – Modelo de regressão entre radiação global e Índice UV – (a) inverno e (b) outono	95
Figura 39 – Modelo de regressão entre radiação global e Índice UV – médias diárias	96
Figura 40 – Modelos de regressão linear mensais.....	97
Figura 41 – Distribuição dos dados levantados no SENSU-ML8511 e GUV-2511	99
Figura 42 – Mapa de calor do teste de Spearman – Correlação entre variáveis.....	100
Figura 43 – Gráfico de dispersão com amostra total do experimento – IUV_{SENSU} e IUV_{GUV}	102
Figura 44 – Modelos polinomiais grau 1, 2 e 3 com conjunto de dados de teste - IUV_{SENSU} e IUV_{GUV}	102

Figura 45 – Modelo polinomial grau 3, Observações vs. Resíduos, Histograma e boxplot dos resíduos – $IUV_{SENSU} \times IUV_{GUV}$	104
Figura 46 – Modelos polinomiais grau 1, 2 e 3 com conjunto de dados de teste - $UV_{SENSU} \times UVA_{GUV}$	105
Figura 47 – Histograma e boxplot dos resíduos – $UV_{SENSU} \times UVA_{GUV}$	106
Figura 48 - Gráfico de dispersão com amostra total do experimento – UV_{SENSU} e UVB_{GUV}	107
Figura 49 – Modelos polinomiais grau 1, 2 e 3 com conjunto de dados de teste	107
Figura 50 – Modelo polinomial grau 3, Observações vs. Resíduos, Histograma e boxplot dos resíduos – Modelo $UV_{SENSU} \times UVB_{GUV}$	109
Figura 51 – Gabaritos e usos do solo na Praça Silvio Porto (a) e no Parque Parahyba 2 (b)	110
Figura 52 – Localização da área de estudo: (a) Praça Sílvio Porto, Manaíra; (b) Parque Paraíba II, Jardim Oceania. Fonte: Adaptada da imagem da autora.....	111
Figura 53 – Estações de medição selecionadas por espécie arbórea (a) Munguba; (b) Olho de Pombo; (c) Jacarandá Mimoso; (d) Ipê Rosa; (e) Leucena; (f) Jamelão.....	112
Figura 54 – Esquema de levantamento dimensional das árvores: (a) Munguba; (b) Olho de Pombo; (c) Jacarandá Mimoso; (d) Ipê Rosa; (e) Leucena; (f) Jamelão.	114
Figura 55 – Estação Sombra: Radiação UV e Fator de Céu segmentado.....	116
Figura 56 – Estação Sombra: Radiação UV e Fator de Céu segmentado por turno.....	117
Figura 57 – Estação Sombra: (a) Radiação UV e (b) Fator de Céu segmentado por tipo de céu.....	117
Figura 58 – Histograma e boxplot das estações – Radiação UV e Fator de Céu segmentado	118

Figura 59 – Imagens hemisféricas e representações dos diagramas dos fatores de céu – Sky View Factor, Sun Coverage Factor e Fator de Céu segmentado – das Estações Sombra	119
Figura 60 – Diagramas de Fator de Céu segmentado com caminho do sol por dia de medição	120
Figura 61 – Distribuição dos dados de radiação UV por turno.	122
Figura 62 – Distribuição dos dados de radiação UV por dia de medição	125
Figura 63 – Estação Sol: Distribuição dos dados de radiação UV por turno e por condição de céu predominante	126
Figura 64 – Imagens hemisféricas e diagramas dos fatores de céu – Sky View Factor, Sun Coverage Factor e Fator de Céu segmentado – das Estações Sol.	127
Figura 65 – Fator de atenuação da radiação UV medida na Estação sol em comparação com as demais estações (sombra).....	127
Figura 66 – Percentagem observada para estações sombreadas (a) Síntese D e (b) Disponibilidade de céu, e estações sem obstrução (c) Síntese D e (d) Condição de céu para ambas	130
Figura 67 – Razão das chances e Intervalos de confiança – Modelo 1	132
Figura 68 – Razão das chances e intervalo de confiança – Modelo 2A	135
Figura 69 – Razão das chances e Intervalo de confiança – Modelo 2B Ajustado.....	137
Figura 70 – Razão das chances e Intervalo de confiança – Modelo 2C	139
Figura 71 – Razão das chances e Intervalo de confiança – Modelo 2D Ajustado	142
Figura 72 – Curva ROC e Área sobre a curva AUC– Modelo 1	143
Figura 73 – Curva ROC e Área sobre a curva AUC – Modelos 2A, 2B, 2C e 2D.....	144

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Temáticas pesquisadas e palavras-chave utilizada	32
Tabela 2 – Alcance do Índice UV e tempo de exposição correspondente a queimadura e fotossíntese de vitamina D para pele de fototipo II. (Fonte: Mckenzie <i>et al.</i> , 2009) ..	43
Tabela 3 – Critérios de Índice UV e tempo de exposição adotados em correspondência à queimadura e síntese de vitamina D (Fonte: Mckenzie <i>et al.</i> , 2009)	72
Tabela 4 – Escala do coeficiente de correlação de Pearson	79
Tabela 5 – Estatística descritiva horária	89
Tabela 6 – Relação entre Radiação Global e IUV mensal – correlação, coeficiente de determinação e métricas de erros.....	98
Tabela 7 – Estatística descritiva	100
Tabela 8 – Resultado do teste de Spearman e Teste de Hipótese Mann-Whitney	101
Tabela 9 – Resultado das métricas de desempenho dos modelos polinomiais - IUV _{GUV} e IUV _{SENSU}	103
Tabela 10 – Descrição do modelo polinomial grau 3 - IUV _{GUV} e IUV _{SENSU}	103
Tabela 11 – Resultado das métricas de desempenho dos modelos polinomiais.....	105
Tabela 12 –Resultado dos testes de análise de resíduos - UV _{SENSU} X UVA _{GUV}	106
Tabela 13 – Resultado das métricas de desempenho dos modelos polinomiais.....	108
Tabela 14 – Descrição do modelo polinomial grau 3 entre UVB _{GUV} e UV _{SENSU}	108
Tabela 15 – Principais características dimensionais das árvores urbanas investigadas	113
Tabela 16 – Características gerais das estações de medição	115

Tabela 17 – Estatística descritiva dos dados de radiação UV e Fator de Céu Segmentado	116
Tabela 18 – Dados gerais das Estações Sombra: Turno, duração do sol e fatores de céu. 120	
Tabela 19 – Resultado do teste de Dunn-Bonferroni com valor p ajustado por estação ...	121
Tabela 20 – Resultado do teste de Dunn-Bonferroni com valor p ajustado no turno da manhã	123
Tabela 21 – Comparativo entre os fatores de visão (SVF e SF) turno manhã	123
Tabela 22 – Resultado do teste de Dunn-Bonferroni com valor p ajustado no turno da tarde	124
Tabela 23 – Comparativo entre os fatores de visão (SVF e SF) turno manhã	124
Tabela 24 – Contribuição e fator de atenuação da radiação UV nas Estações Sombra e Sol	128
Tabela 25 – Variáveis dos modelos logísticos.....	129
Tabela 26 – Predição de vitamina D em área aberta – Modelo 1*	131
Tabela 27 – Razão das chances – Modelo 1*	132
Tabela 28 – Predição de vitamina D em área sombreada – Modelo 2A	133
Tabela 29 – Razão das chances – Modelo 2A	134
Tabela 30 – Predição de vitamina D em área sombreada – Modelo 2B.....	135
Tabela 31 – Predição de vitamina D em área sombreada – Modelo 2B Ajustado	136
Tabela 32 – Razão das chances – Modelo 2B Ajustado.....	136
Tabela 33 – Predição de vitamina D em área sombreada – Modelo 2C.....	138
Tabela 34 – Predição de vitamina D em área sombreada – Modelo 2C Ajustado	138

Tabela 35 – Razão das chances – Modelo 2C Ajustado.....	139
Tabela 36 – Predição de vitamina D em área sombreada – Modelo 2D	140
Tabela 37 – Predição de vitamina D em área sombreada – Modelo 2D Ajustado	141
Tabela 38 – Razão das chances – Modelo 2D Ajustado.....	142
Tabela 39 – Indicadores de desempenho dos Modelos	144

I - INTRODUÇÃO

1. INTRODUÇÃO

Os espaços urbanos saudáveis podem ser definidos como ambientes externos que promovem o bem-estar físico, mental e social aos habitantes (Smithers *et al.*, 2018; Yin *et al.*, 2022). A incorporação de espaços verdes e infraestrutura verde nas cidades desempenha um papel fundamental na mitigação das consequências da crescente urbanização. Os ecossistemas urbanos exercem diversas funções essenciais, incluindo a regulação climática, a retenção de águas pluviais, a melhoria da biodiversidade e benefícios culturais, estéticos e de salubridade. Esses espaços não apenas contribuem para a qualidade de vida dos residentes urbanos, mas também para a sustentabilidade ambiental das cidades (Fernandes; Barreto Junior, 2017; Wolch; Byrne; Newell, 2014).

A urbanização acelerada, fenômeno que tem sido observado globalmente, representa um desafio significativo para a criação e manutenção de espaços urbanos. Atualmente, cerca de 55% da população mundial vive em áreas urbanas, com previsão de aumento para 68% até 2050, segundo o relatório oficial das Nações Unidas - *World Urbanization Prospects* (ONU, 2019). O crescente adensamento das cidades leva a mudanças expressivas nas superfícies urbanas, associadas a vários fenômenos ambientais, tais como efeitos de ilhas de calor com o aumento da temperatura e radiação solar, e agravamento da poluição do ar. A preocupação com o acesso a fontes naturais e renováveis se intensificou, em virtude das problemáticas energéticas e climáticas presentes nos últimos anos. Com a perspectiva de um aumento progressivo na urbanização nos próximos anos, torna-se imperativo adotar estratégias inovadoras e sustentáveis para garantir que as cidades possam oferecer ambientes urbanos que favoreçam a saúde e o equilíbrio entre os ecossistemas e a expansão urbana.

O sombreamento urbano, proveniente tanto do ambiente natural, como árvores, quanto do ambiente construído, como edifícios, pode ser considerado uma alternativa para melhoria da configuração de espaços urbanos. Especialmente no clima tropical, as sombras naturais não apenas melhoram a conveniência de uso do espaço urbano, tornando-o mais agradável para caminhadas, mas também são essenciais para reduzir os riscos de exposição solar excessiva, como a incidência de radiação ultravioleta (Parisi; Turnbull, 2014; Turnbull; Parisi, 2008). Esta abordagem promove a segurança e o conforto dos pedestres, contribuindo para a criação de ambientes urbanos mais sustentáveis e saudáveis.

A radiação ultravioleta exerce uma função imprescindível na saúde humana com ações permanentes causadas pela exposição casual ou excessiva (WHO, 2002). No panorama nacional, muito embora o câncer de pele seja o tipo mais comum, as informações que fundamentam os benefícios do sol na saúde são escassas. A exposição demasiada à radiação solar é recorrente por parte da população brasileira que, muitas vezes, desconhece os riscos associados a ela (Benvenuto-Andrade *et al.*, 2005; Silva, 2016). O excesso de radiação solar não só produz o desconforto eritemal, como também aumenta o risco de danos à pele e aos olhos a longo prazo. Por outro lado, a exposição comedida gera consequências não tão notórias quanto as queimaduras, como a síntese cutânea de vitamina D. A ação espectral do eritema¹ e da vitamina D são coincidentes em comprimentos de ondas mais curtos, mais especificamente na porção UVB que compreende da faixa 280 a 320nm. A partir da 320nm, já na porção UVA, a resposta eritemal é mais evidente com decréscimo gradativo até 400nm (Figura 1).

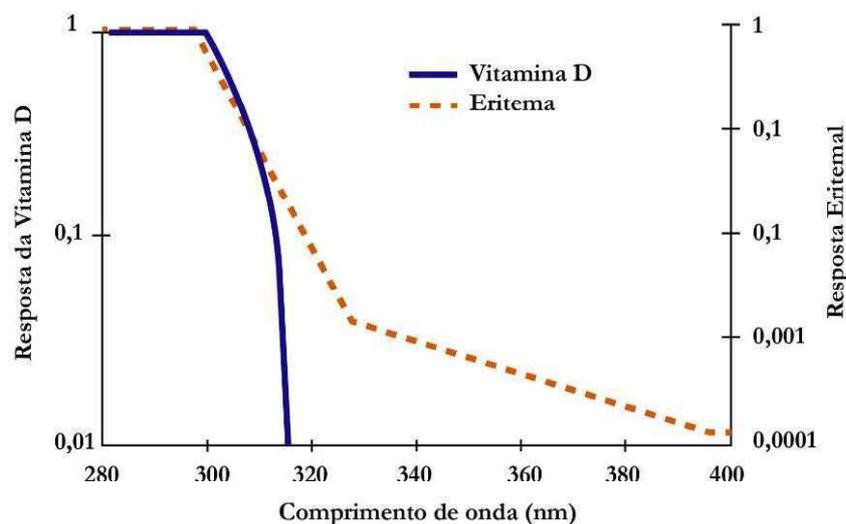


Figura 1 – Ação espectral para produção de vitamina D e formação de eritema. (Fonte: Adaptado de Youl; Janda; Kimlin, 2009)

Devido à natureza conflitante da exposição ao sol, pesquisas, sobretudo nas ciências médicas, fotoquímicas e fotobiológicas, discutem sobre o período ideal de exposição

¹ Eritema solar, popularmente conhecido como queimadura de sol, é um tipo de dermatite ou reação inflamatória que ocorre na pele após exposição excessiva a raios ultravioletas solares de forma aguda. A quantidade de exposição ao sol necessária para produzir queimaduras varia de acordo com a quantidade de melanina da pele, geralmente visível como a quantidade de pigmentação, a capacidade de produzir mais melanina e a quantidade de raios UV presente na luz solar, no dia da superexposição.

saudável ao sol. Por um curto período, atividades ao ar livre durante o dia sob à luz do sol são favoráveis, uma vez que regula o relógio biológico com ativação dos ritmos circadianos e ainda estimula a produção de vitamina D com a incidência dos raios UV. O corpo humano tem uma grande capacidade de sintetização da vitamina D com o mínimo de exposição ao sol. Por esta razão, é recomendado expor entre 20 e 25% da superfície corporal (equivalente aos braços e pernas) das 10h às 15h por, no mínimo, três vezes por semana, dependendo da estação do ano, latitude e grau de pigmentação da pele. Para adultos de pele clara, as estações da primavera, verão e outono podem ajudar no fornecimento das necessidades de vitamina D, pouco habitual nos períodos de menor incidência como o inverno (Holick, 2011). Segundo a classificação de Fitzpatrick, a exposição a uma radiação ultravioleta entre 20 e 200mJ/cm² pode variar de 10 a 120 minutos para atingir a dose eritematosa mínima² - DEM (*Minimum Erythmal Doses* - MED), dependendo do tipo de pele (Fitzpatrick, 1988).

O hormônio D ou a vitamina do sol é essencial para prevenção de muitas enfermidades e requer níveis de radiação em comprimentos de onda menores que 315 nm, os quais são mais prejudiciais em outros aspectos, mesmo ocorrendo em doses muito inferiores à DEM (Scragg, 2011). Estudos comprovam o efeito da exposição solar contra eventos de doenças respiratórias, sobretudo na melhora dos sintomas de H1N1 (Gruber-Bzura, 2018) e na redução da mortalidade por coronavírus (Lansiaux *et al.*, 2020; Rosario *et al.*, 2020). Sendo assim, algumas evidências indicam que a expectativa de vida e a supressão na ocorrência de gripes estão correlacionadas positivamente com a exposição ao sol.

Do ponto de vista ambiental, a quantidade de luz solar em qualquer ponto da Terra depende da localização geográfica, hora do dia, período do ano e outras condições atmosféricas e climáticas relevantes, como cobertura das nuvens e ozônio, as quais determinam a incidência de radiação solar. Em locais, cuja latitude está acima de 37° durante os meses de inverno, ocorrem diminuições significativas no número de fótons UVB que atinge a superfície da Terra. Por consequência disso, ocorre a redução da síntese de vitamina D em virtude da frequência de céu encoberto e da precipitação. Para localizações abaixo de

2 A Dose Eritematosa Mínima ou DEM é a menor dose de radiação ultravioleta capaz de provocar eritema cutâneo quando medido 24h após a irradiação. A mensuração da DEM é realizada usualmente por meio da visualização da cor por uma simples observação. A análise do DEM representa fator clínico significativo na avaliação da sensibilidade da pele à exposição solar.

37° e mais próximas do Equador, a concentração de vitamina D ao longo do ano tende a ser mais significativa (Webb; Kline; Holick, 1988).

No contexto urbano, o adensamento dos edifícios provoca diminuição da disponibilidade de céu, dependendo do grau de sombreamento gerado. Este bloqueio pode ser atribuído à configuração e dimensões dos edifícios, em especial a altura e espaçamento, e consequente porção de céu visível. Neste sentido, as características do entorno são variáveis imprescindíveis, principalmente em locais com malha urbana obstruída. Sob esta ótica, áreas densamente construídas podem reduzir expressivamente os níveis de radiação e os ganhos solares (Ünver, 2003; Córica; Pattini, 2011; Scalco; Pereira; Rigatti, 2010), ao passo que é necessário estabelecer limites à densificação urbana.

O controle da obstrução do céu pode ser medido com a utilização de indicadores, propostos com intuito de avaliar parâmetros essenciais para análise do contexto urbano (Hopkinson *et al.*, 1966; Oke, 1981; Robbins, 1985; Leder; Pereira; Claro, 2008; Littlefair, 2011). Estes, por sua vez, visam garantir condições mínimas de insolação e/ou de acesso à luz natural à edificação, mesmo não determinando critérios avaliativos para a saúde humana. Dependendo das características do meio urbano, notadamente o adensamento e verticalização, o sombreamento é mais presente. Diante desta problemática e considerando o clima tropical quente e úmido de baixa latitude, pretende-se responder as seguintes questões:

- **Quais são os limites admissíveis de radiação ultravioleta e os fatores que impactam na síntese D?**
- **Quanto as obstruções no meio urbano interferem na visibilidade do céu e na disponibilidade de radiação solar?**
- **É possível quantificar o impacto do sombreamento urbano na redução da radiação ultravioleta, sobretudo nos comprimentos de onda responsáveis pela sintetização da vitamina D?**
- **Qual é o nível de obstrução urbana, proveniente de árvores e edifícios, para sombreamento e exposição saudável ao sol à radiação ultravioleta?**

O avanço das pesquisas já comprova a associação entre a iluminação natural e seus impactos no campo da saúde, ainda que doses diárias de luz e radiação solar ainda não

estejam bem delimitadas junto aos documentos normativos e regulamentos técnicos nacionais. A permanência prolongada das pessoas em ambientes fechados, com ou sem aberturas, tem sido relacionada ao aparecimento de enfermidades, sobretudo de cunho psicológico e comportamental. Segundo o Comitê Internacional de Iluminação CIE-S026:2018, o contato com a luz natural deve ser dial, mesmo não apresentando um padrão mínimo para exposição. Regulamentos técnicos da construção civil ainda não determinaram limites diários de acesso ao sol para promover a salubridade do ambiente construído no Brasil. Segundo os requisitos da NBR 15.575, são instituídos níveis gerais de iluminação natural (iluminância) em categorias mínima, intermediária e máxima, 60, 90 e 120 lux respectivamente, bem como sugere a aplicação de método do Fator de Luz Diurna³ (FDL). No entanto, não se avalia as condições externas e nem os impactos das obstruções nos níveis de iluminação, muitas vezes avaliada sob condição de incidência de luz difusa. Considerando esta lacuna, esta tese defende as seguintes hipóteses:

- **As características morfológicas do espaço urbano influenciam na disponibilidade de céu, gerando impactos significativos na admissão da radiação ultravioleta;**
- **A exposição à radiação ultravioleta no meio urbano, quando parcialmente obstruído por vegetação ou edifícios, pode mitigar riscos de queimaduras solares e ser suficiente para produção do hormônio D;**
- **É possível estabelecer limites admissíveis de radiação ultravioleta no meio urbano de modo que garanta acesso à radiação solar controlada e salubridade.**

As consequências da obstrução no meio urbano podem comprometer a salubridade do ambiente construído por limitar o acesso ao sol. Neste sentido, esta pesquisa conduziu **uma investigação sobre a obstrução urbana, por meio da proposição de um indicador de visão de céu adaptado aos já consolidados na literatura, e a magnitude da radiação solar ultravioleta em recortes urbanos com diferentes estratégias de sombreamento, estabelecendo critérios para possível geração de espaços urbanos saudáveis.**

³ Segundo a NBR 15.575, o Fator de Luz Diurna é a parcela de luz difusa oriunda do exterior que atinge o ponto interno à 0,75m do piso.

4.1 Justificativa

Não há um consenso global sobre o direito ao sol. Embora sejam desenvolvidos documentos normativos e sistemas de certificações que instituam condições mínimas para garantia à luz natural em edifícios, a legislação ainda é deficiente e restritiva. Segundo as normativas internacionais, os requisitos associados à iluminação natural são baseados em faixas de iluminância, muitas vezes com níveis mínimos pouco satisfatórios. Alguns códigos de obras definem como critérios dimensionais áreas mínimas de aberturas e sua relação com a superfície do piso ou da fachada, mesmo que não assegurem uma quantidade suficiente de luz solar. Além disso, os requisitos para análise da qualidade da iluminação natural abordam unicamente aspectos visuais, desconsiderando o contato com o ambiente externo, o contexto urbano, e, especialmente, a sua relação com os efeitos biológicos (Darula; Christoffersen; Malikova, 2015; Luca, 2017; Sokol; Martyniuk-Peczek, 2016).

A sintetização da vitamina D é essencial para saúde humana. Quando insuficiente, medida pela baixa concentração de 25-hidroxivitamina D (25(OH)D) no sangue, pode ocasionar aparecimento de doenças cardiovasculares, diabetes, esclerose múltipla, disfunção cognitiva e alguns tipos de câncer (Holick, 2011). Um dos fatores que interfere nos baixos níveis de vitamina D é a limitação da exposição aos raios solares UVB (Youl; Janda; Kimlin, 2009). Entre as doenças virais, o Coronavírus é considerado três vezes mais sensível à radiação ultravioleta que o vírus Influenza. Estudos sugerem que mais de 90% do vírus SARS-CoV-2 pode ser inativado após exposição solar ao meio-dia em 34 minutos (Sagripanti; Lytle, 2020; Tang *et al.*, 2021). Os casos confirmados de COVID-19 e a taxa de mortalidade em alguns países europeus apresentaram correlação negativa com a média dos níveis suficientes de vitamina D. Ainda, existem algumas evidências sobre a eficácia da exposição à luz solar na redução da transmissão de doenças respiratórias virais (Gruber-Bzura, 2018; Tang *et al.*, 2021) e do risco de infecção por COVID-19, relacionando doses eritemais de radiação UV.

A obstrução ocasionada pelo meio urbano é uma variável diretamente relacionada ao acesso solar. Por meio dela, as fontes de luz solar direta e da abóbada celeste são alteradas e sua presença nos ambientes internos passa a depender da magnitude da obstrução no entorno (Wai; Yu; Lam, 2015). Os indicadores de obstrução do céu são elaborados por meio de

parâmetros avaliativos da ocupação nos espaços urbanos que objetivam assegurar condições mínimas de insolação, bem como de acesso à luz natural à edificação (Leder; Pereira; Claro, 2008; Littlefair, 2011). A legislação nacional não prioriza tal variável, principalmente se tratando dos efeitos na salubridade, e se limita apenas à parâmetros urbanísticos, como índice de aproveitamento, taxas de ocupação e disposição da construção no lote, como afastamentos e recuos.

São escassas as pesquisas que quantificam a exposição solar necessária para a síntese adequada de vitamina D em pessoas com pele mais escura e em pessoas que vivem em baixas latitudes, assim como os estudos em populações urbanas que podem ter oportunidades limitadas de exposição solar. Existem lacunas em relação aos valores e ao tempo de exposição à radiação UV necessários para a síntese adequada de vitamina D, considerando a cor da pele, a geografia, o clima e a radiação solar. As soluções baseadas na natureza que podem mitigar as alterações climáticas estão se tornando cada vez mais importantes para prevenir a deficiência de vitamina D. O investimento em áreas urbanas verdes não apenas estimula a prática de atividade física, mas também transforma esses espaços em ambientes saudáveis e acessíveis. Além de fomentar a coesão social, a presença de áreas verdes contribui para a melhoria da saúde mental e a redução de doenças cardiovasculares, diabetes e respiratórias, destacando a importância do planejamento urbano voltado para o bem-estar da comunidade (Kabisch; van den Bosch; Laforzezza, 2017; Pauleit *et al.*, 2017; Rahman *et al.*, 2019).

Um dos pontos que defende o desenvolvimento desta pesquisa é a escassez de estudos que envolvem esta temática, sobretudo no âmbito nacional. A falta de contato com a radiação solar tem sido associada à maior ocorrência de doenças como câncer, doenças degenerativas, comportamentais e distúrbios do sono (Boubekri, 2008), sendo imprescindível ações nessa direção. A definição de critérios urbanos que abrangem os efeitos biológicos da radiação solar também é pouco explorada no campo da engenharia, arquitetura e urbanismo. Anseia-se, portanto, **fomentar a adoção de políticas de saúde pública que visem o planejamento urbano e a integração de áreas verdes, sombreadas e acessíveis para a população e contribuir para a disseminação de pesquisas que abordem a obstrução do céu, a incidência de radiação ultravioleta e a salubridade no meio urbano sob uma ótica original e inovadora.**

4.2 Objetivos

Geral:

Investigar o impacto da obstrução do céu na disponibilidade de radiação ultravioleta para a geração de espaços urbanos saudáveis na cidade de João Pessoa/Paraíba

Específicos:

- Analisar a relação horária, mensal e sazonal entre o índice ultravioleta e a radiação global na cidade de João Pessoa/PB;
- Avaliar e comparar instrumentos de medição de radiação ultravioleta como opção viável para implementação de soluções de baixo custo;
- Investigar o impacto da obstrução do céu na magnitude da radiação ultravioleta em áreas urbanas sombreadas e desobstruídas;
- Estimar e prever a probabilidade de síntese de vitamina D utilizando o índice ultravioleta (IUV) como indicador para a identificação de espaços saudáveis em ambientes urbanos.

4.3 Estrutura da tese

As partes integrantes da tese estão divididas em **5 capítulos**, sendo:

- **Introdução** - A tese inicia com os apontamentos introdutórios, abordando o contexto geral da pesquisa e a importância da investigação da obstrução do céu, e dos impactos das configurações morfológicas do meio urbano na salubridade. Na sequência, apresentam-se os elementos pré-textuais como questões, hipóteses, justificativa e objetivos da pesquisa.
- **Capítulo I – Referencial Teórico** – Foi apresentado o aporte teórico com revisões de literatura abordando temáticas sobre (a) Espaços urbanos saudáveis, (b) Disponibilidade solar e salubridade, com ênfase na exposição do sol, queimaduras e sintetização da vitamina D, e (c) Direito ao sol com métodos de avaliação e indicadores urbanos já consolidados.
- **Capítulo II – Metodologia** – Este capítulo apresenta a caracterização da área de estudo, discute as etapas para levantamento e coleta de dados de índice ultravioleta na cidade de João Pessoa e radiação UV em recortes urbanos em áreas abertas e sombreadas por árvores e edifícios, bem como os procedimentos estatísticos aplicados para investigação dos registros coletados, com análise exploratória e descritiva, testes de correlação e criação de modelos de regressão (lineares, polinomiais e logísticos).
- **Capítulo III – Resultados e Discussões** – Este capítulo é destinado à apresentação e análise dos resultados obtidos com aplicação das etapas do procedimento metodológico. As avaliações realizadas compreenderam 4 subtópicos. O primeiro trata sobre a radiação ultravioleta eritemal na cidade de João Pessoa e um comparativo entre a radiação global. O segundo aborda a intercomparação entre instrumentos de medição de radiação UV (Confortímetro SENSU e radiômetro GUV), apresentando modelos polinomiais que representam e predizem as variáveis dependentes. Na sequência, se avalia a obstrução do céu e a magnitude da radiação UV em áreas urbanas, com ênfase em dois contextos urbanos, um obstruído por árvores e edifícios e outro em área aberta

e desobstruída. Por fim, a avaliação de estações de medição de radiação UV é apresentada com a finalidade de predição de síntese de vitamina D em ambiente urbano.

- **Conclusão** – É realizada uma síntese geral dos resultados com a hipótese e objetivos propostos na tese, apresentando considerações sobre o que foi investigado e os principais desdobramentos. Ainda, são destacadas as limitações da pesquisa e as recomendações para trabalhos futuros.

A Figura 2 ilustra o fluxograma com as etapas aplicadas nesta tese:

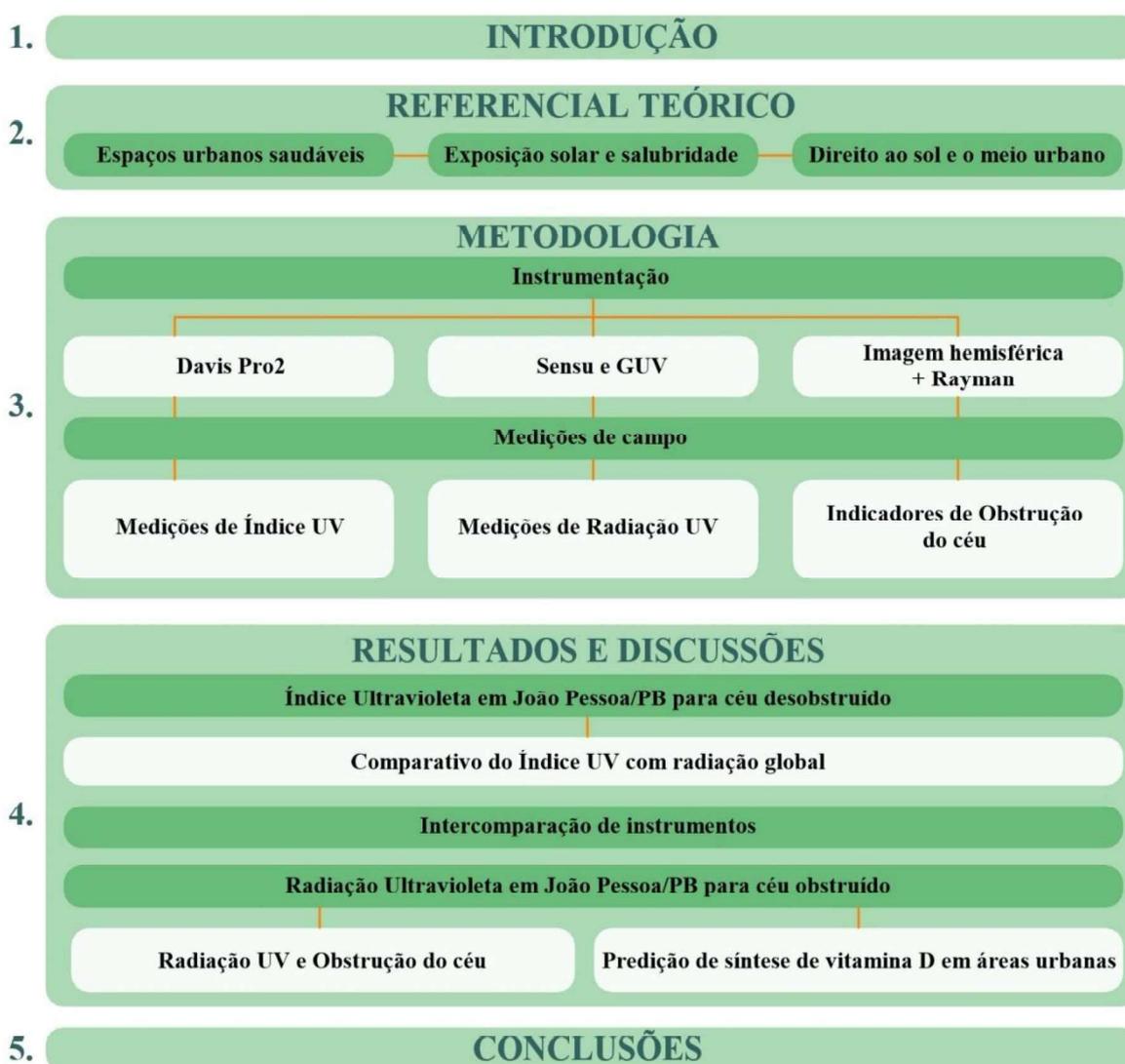


Figura 2 – Fluxograma com capítulos da pesquisa realizadas na tese.

II - REFERENCIAL TEÓRICO

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Neste tópico da tese, foram apresentados e discutidos os estudos sobre os temas: **espaço urbano, acesso solar e salubridade**. Na primeira análise teórica, foi realizada uma conceituação dos **espaços urbanos saudáveis**, dando ênfase à promoção do sombreamento como estratégia para melhoria da qualidade do meio urbano. Na segunda, foram abordados conceitos relativos à **exposição solar e salubridade**, com destaque para os efeitos benéficos da radiação ultravioleta, sobretudo na síntese de vitamina D, e dos deletérios, como a queimadura solar. Na terceira e última fundamentação, foi apresentada a relação do **direito ao sol e o meio urbano**, conceituando indicadores e métodos de avaliação da disponibilidade solar e de obstrução do céu, com abordagens de alguns estudos de casos. As bases de dados consultadas foram a plataforma brasileira, **Portal de Periódicos CAPES**, a de literatura médica, **Public Medical – PubMed**, Scopus e a Science Direct⁴, cujas palavras-chaves adotadas estão destacadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Temáticas pesquisadas e palavras-chave utilizada

Temáticas	Palavras-chave
Espaços urbanos saudáveis	<i>Urban space, health, green urban space, urban shade, building and tree shade</i>
Exposição solar e salubridade	<i>Vitamin D, 25-Hydroxyvitamin D, 25(OH)D, radiation, sun exposure, sunlight exposure, ultraviolet radiation, latitude, season, age, gender</i>
Direito ao sol e o meio urbano	<i>Sunlight, radiation, solar access, solar right, solar radiation, solar performance Urban, morphology, sky view, solar exposure, obstruction, sky exposure</i>

A estratégia de busca foi limitada a artigos de periódicos desenvolvidos em recorte temporal até 2023. Todas as publicações relacionadas foram avaliadas de modo a encontrar as elegíveis, cujos títulos e/ou resumos abordassem associações entre os temas, aplicando-se ainda combinações dos termos de pesquisa. Os trabalhos selecionados foram examinados de modo a garantir a inclusão dos mais relevantes.

⁴ Os endereços de acesso para os portais/plataformas são: www.periodicos.capes.gov.br, <http://www.nlm.nih.gov>, www.scopus.com e www.sciencedirect.com.

2.1. Espaços urbanos saudáveis

Espaços verdes urbanos podem ser considerados áreas naturais capazes de trazer melhorias ao bem-estar humano, seja pelo alívio aos pedestres proporcionado pela arborização e redução das cargas térmicas (Yin *et al.*, 2022), como também pelo acesso à energia vital do sol, em especial da radiação visível e ultravioleta. Cabe destacar a Lei Federal nº 12.651/2012, também conhecida como Novo Código Florestal, que define áreas verdes urbanas como:

espaços, públicos ou privados, com predomínio de vegetação, preferencialmente nativa, natural ou recuperada, previstos no Plano Diretor, nas Leis de Zoneamento Urbano e Uso do Solo do Município, indisponíveis para construção de moradias, destinados aos propósitos de recreação, lazer, melhoria da qualidade ambiental urbana, proteção dos recursos hídricos, manutenção ou melhoria paisagística, proteção de bens e manifestações culturais (Brasil, 2012).

Elementos essenciais do ambiente urbano, os espaços verdes também auxiliam na regulação climática, retenção de águas pluviais, melhoria da biodiversidade e benefícios culturais, estéticos e de saúde. Habitar em locais com maior arborização também está correlacionado com o aumento das práticas ao ar livre, como caminhada, diminuição do uso de transporte motorizados e participação mais frequente em atividades físicas (Fernandes; Barreto Junior, 2017; Wolch; Byrne; Newell, 2014). Adicionalmente, fornece serviços ecossistêmicos, que podem beneficiar as pessoas ao lidar com muitas doenças e, por vezes, melhorar a qualidade de vida (Wolch; Byrne; Newell, 2014).

A pandemia causada pelo novo coronavírus (Covid-19) deveria ser interpretada como um alerta dos ecossistemas terrestres. Como forma de mitigar e desacelerar o surto do vírus, foi implementada a estratégia do distanciamento social e quarentena por parte das autoridades mundiais em resposta à propagação exponencialmente global (Salama, 2020). Esta principal medida da campanha global de saúde pública foi implementada e efetiva durante pandemias anteriores, como a gripe espanhola e a gripe suína (H1N1). Apesar do seu papel significativo, o distanciamento social consistiu também em encorajar o distanciamento físico e reduzir a associação com pessoas em ambientes urbanos, contradizendo o conceito de “lugar de encontro das coisas e pessoas, da troca e simultaneidade” (Lefebvre, 2002).

Além dos impactos econômicos, a política de quarentena levou a um declínio na saúde pública (física e mental) devido à esta limitação na interação social (Xie *et al.*, 2020). A relação entre áreas verdes urbanas e saúde mental durante a pandemia da Covid-19 reduziu o stress causado pelo confinamento e proporcionou oportunidades de relaxamento, promovendo a resiliência urbana (Maury-Mora; Gómez-Villarino; Varela-Martínez, 2022; Tendais; Ribeiro, 2020). As práticas de atividades físicas ao ar livre fomentadas pelos ambientes verdes sombreados colaboraram para um maior contato com o ambiente externo. Além disso, o uso destas áreas pode oferecer exposição à energia vital do sol.

No panorama atual das mudanças climáticas, ambientes urbanos sombreados são considerados imprescindíveis para saúde, particularmente em zonas de clima quente e úmido (Smithers *et al.*, 2018; Yin *et al.*, 2022). Os benefícios das árvores urbanas para a saúde humana são comprovados quando também envolvem temas relacionados com a redução da poluição do ar, das concentrações de ozônio a nível do solo e da temperatura, mesmo sob efeito de ilha de calor (Knight *et al.*, 2021). Alguns mecanismos de ação verde podem ser adotados como forma de mitigar os impactos das alterações climáticas à saúde (Figura 3).

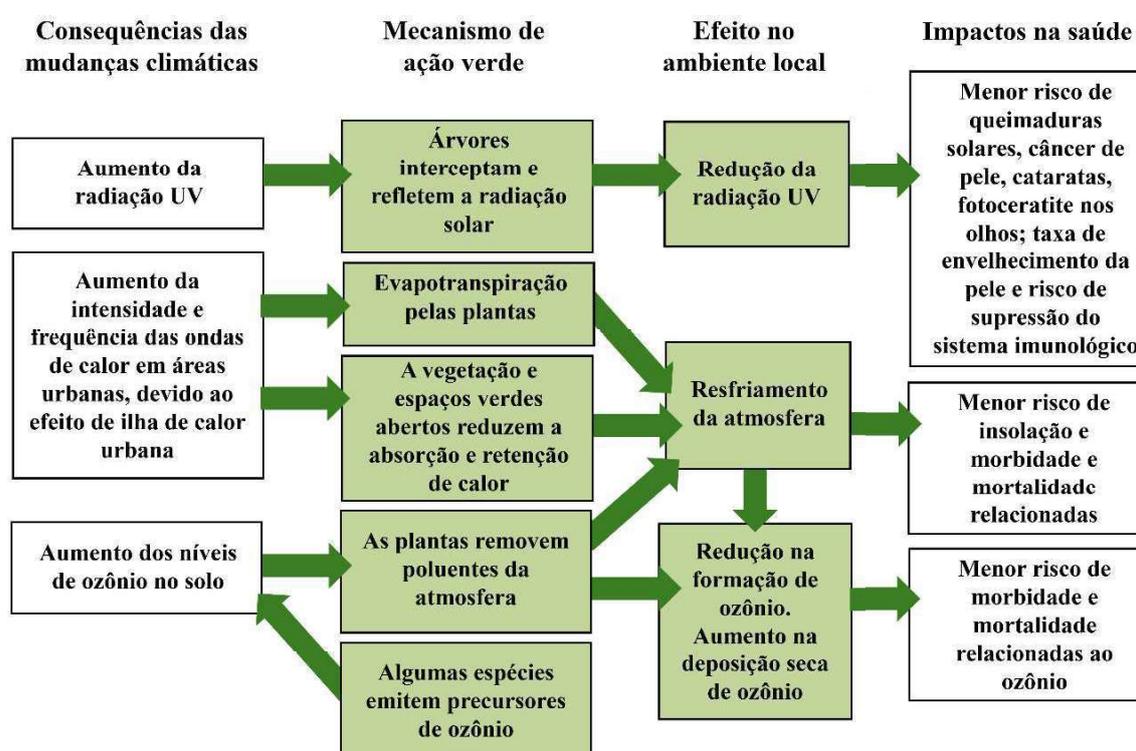


Figura 3 – Mecanismo de ação verde com sombreamento urbano e impactos na saúde frente a mudanças climáticas (Fonte: Traduzido e adaptado de Knight *et al.* (2016)).

Uma estratégia para a adaptação aos efeitos deletérios e positivos à saúde da exposição ao sol é aumentar a abundância e cobertura vegetal nos espaços urbanos, bem como o acesso público a estas áreas verdes. As sombras urbanas são componentes essenciais para a minimização da temperatura e da radiação UV (Parisi; Turnbull, 2014; Turnbull; Parisi, 2008). As árvores reduzem a irradiância ultravioleta na sua sombra quando bloqueiam o céu e o sol (Grant, 1997; Heisler; Grant, 2000). Onde árvores ou outras estruturas obstruem apenas o sol e deixam parcela do céu visível, a irradiância UV terá maior impacto quando comparado com áreas na sombra (Hasegawa *et al.*, 2017; Parisi; Turnbull, 2014). Outros fatores afetam o grau de proteção à radiação UV fornecidos pela sombra das árvores os quais incluem refletividade das superfícies circundantes e comportamentos individuais, como níveis de atividade física ao ar livre e tipo de roupa (Downs *et al.*, 2019; Grant; Heisler; Gao, 2002; Igoe *et al.*, 2020).

Embora a exposição à radiação UV possa trazer múltiplos benefícios para a saúde, a exposição excessiva é prejudicial. Frequentemente relatados sobre os efeitos danosos à saúde dos olhos (Delcourt *et al.*, 2014) e da pele, como câncer e queimaduras (Leiter *et al.*, 2014; Mullenders, 2018), irradiâncias ultravioletas são também responsáveis pela sintetização da vitamina D, fornecendo consequências benéficas (Heisler; Grant, 2000). Estudos sobre os impactos da morfologia urbana na exposição a UV são ainda restritos à avaliação de áreas sombreadas ao nível da rua. O conhecimento da distribuição espacial e temporal da radiação UV, bem como de métodos de predição, é de grande valia para estudos da epidemiologia, que, muitas vezes, apresentam informações abrangentes e se replicam em diversos locais, cujas características ambientais são distintas (Du *et al.*, 2020; Igoe *et al.*, 2020).

Diferente dos países de latitude alta, a menor exposição ao calor em regiões de clima tropical pode se relacionar, direta ou indiretamente, com maiores ocorrências de status suficiente de vitamina D. Um ambiente ao ar livre com microclima agradável torna-se mais convidativo à exposição da pele ao sol. Em contrapartida, a deficiência de vitamina D pode ser agravada pela poluição do ar, que pode ser um fator de atenuação dos raios UVB (Mendes *et al.*, 2020; Webb; Kline; Holick, 1988). A baixa exposição solar diminui a produção do hormônio D, o que causa o aumento dos níveis deficientes, sendo considerada uma das principais causas de problemas de saúde mundial (Osmancevic *et al.*, 2015a, 2015b; Webb; Engelsen, 2008).

Pequenas pausas ao sol - minutos, não horas - sem proteção solar podem ser suficientes para sintetização em pessoas de pele branca (Holick, 2011; Hossein-Nezhad & Holick, 2013; Osancevic *et al.*, 2015). Uma caminhada em um ambiente urbano de cerca de 20 minutos, nos intervalos de almoço, pode ser suficiente para atingir status adequado de vitamina D. Sob condições de céu claro sem nuvens em países com latitudes médias, a exposição solar é suficiente para alcançar 1000UI, considerada concentração recomendada para incremento do hormônio D (Mckenzie *et al.*, 2009; Schrempf *et al.*, 2017; Seckmeyer *et al.*, 2013). Os padrões climáticos dos países tropicais podem trazer novos resultados sobre o tempo necessário de exposição à luz solar para a síntese de vitamina D. São necessárias também análises associadas ao conforto térmico ao ar livre e estilo de vida para estimular a permanência das pessoas no ambiente externo.

De acordo com as diretrizes de proteção solar do Reino Unido, a melhor maneira de aproveitar o sol com segurança é a exposição da pele em áreas sombreadas, especialmente entre 11h e 15h, com uso de roupas de proteção (boné e chapéu) e filtro solar (Cancer Research UK, 2021). No ambiente urbano, as barreiras físicas (Parisi *et al.*, 2019), pausas sob árvores (Gies *et al.*, 2007) ou o uso de guarda-sol (Utrillas *et al.*, 2010) podem ser uma alternativa de segurança para proteção contra queimaduras solares. Essas estratégias são promovidas por organizações de prevenção contra o câncer (Diffey, 2006; NICE guideline, 2016), mesmo sendo necessários mais estudos sobre políticas públicas de saúde relativas à exposição solar e desenvolvimento de estratégias para um melhor aproveitamento e acesso aos espaços verdes urbanos.

2.2. Exposição solar e salubridade

A radiação solar é a principal fonte de energia do nosso planeta. De comprimento de onda curta (entre 100 e 400 nm), a radiação ultravioleta (UV) faz parte do espectro eletromagnético, classificada em três faixas: UVA (315–400 nm), UVB (280–315 nm) e UVC (100–280 nm). A banda UVC e aproximadamente 90% do UVB são absorvidos pela camada de ozônio, precipitação, oxigênio e dióxido de carbono, que estão presentes nas porções superiores da atmosfera (van der Leun, 2004). No entanto, o UVA compõe o maior espectro que atinge a superfície da Terra, sofrendo interferência mínima de componentes atmosféricos.

Responsável pelas transformações biológicas e fotoquímicas no corpo humano, a radiação UV solar estabelece um papel fundamental para a saúde. Efeitos diretos geram consequências na pele (Mullenders, 2018) e nos olhos (Delcourt *et al.*, 2014). A exposição excessiva aos raios UV também implica em danos ao DNA das células da pele, como eritema ou queimaduras solares, e, em casos mais graves, no desenvolvimento de câncer (Autier; Doré, 2020). Por outro lado, a exposição solar é essencial para produção de vitamina D, de serotonina com a melhoria da saúde mental, a liberação de óxido nítrico reduzindo a pressão arterial, entre outros fatores fotoquímicos associados à regulação do ciclo circadiano (Razzaque, 2018; Wacker; Holick, 2013).

Com os avanços nas pesquisas sobre a ação da radiação UV no organismo humano, após a década de 90, novos desafios surgiram no âmbito da saúde pública, em especial, a possível prevenção de diversas doenças (DIFFEY, 2006). Pequenas doses diárias de exposição à luz solar trazem melhorias à saúde, sobretudo para sintetização da vitamina D, também conhecida como a “vitamina do sol” (Holick, 2011). Este micronutriente fundamental para regulação do cálcio e metabolismo do fósforo age na manutenção da saúde óssea e muscular. Também é reconhecida como hormônio imunomodulador por permitir a ativação da imunidade inata e a modulação da resposta adaptativa (Mccarty, 2008; Wacker; Holick, 2013).

Paradoxalmente, a restrição da exposição ao sol, que seria justificada em pacientes com problemas de pele, tem sido questionada, diante de evidências científicas de que a baixa exposição está correlacionada com os riscos à saúde humana. Embora os dermatologistas sejam responsáveis pelo tratamento e orientação na prevenção do câncer e promovam campanhas que são consistentemente centradas nos efeitos negativos da luz solar (Leiter; Eigentler; Garbe, 2014), os benefícios da exposição solar são reconhecidos em termos de expectativa de vida e cura de doenças com altas taxas de mortalidade, como hipertensão, diabetes, doenças cardiovasculares e osteoporose, sendo de menor impacto por ocorrência de câncer de pele (Scragg, 2011).

Por ter o controle da liberação das citocinas inflamatórias, a vitamina D também contribui para redução dos riscos e dos agravamentos de infecções virais respiratórias, como a influenza (Slusky; Zeckhauser, 2021) e coronavírus (Guasp; Laredo; Urra, 2020; Tang *Et*

al., 2021), de doenças autoimunes, como a esclerose múltipla, e de alguns tipos de câncer e diabetes (Scragg, 2011). Algumas pesquisas defendem a hipótese de associação entre os baixos níveis de 25(OH)D e a incidência, a severidade e a mortalidade por infecções respiratórias em crianças e adultos (Sagripanti; Lytle, 2020; Slusky; Zeckhauser, 2021). Com a atual pandemia de COVID-19, iniciada na China em 2019, a taxa desproporcional de contaminação sintomática, a morbidade e a mortalidade sugerem o possível impacto das concentrações de vitamina D na suscetibilidade à infecção, sobretudo em quem apresenta risco elevado de status deficiente, como idosos (Freedman *et al.*, 2013; Samefors; Tengblad; Östgren, 2020; Scragg, 2011).

A irradiância eritematosa envolve parte da faixa UVA e UVB, sendo o parâmetro para avaliação dos níveis de UV na pele representado pelo Índice Ultravioleta (IUV). O IUV foi estabelecido como padrão internacional pela Organização Mundial da Saúde com diretrizes para exposição solar segura, definida como um valor adimensional, integral e positivo. Este índice é dividido em cinco categorias: IUV inferior a 2, IUV entre 3 e 5, IUV entre 6 e 7, IUV entre 8 e 10 e IUV acima de 10 (11+) definidas como de risco baixo, sem necessidade de proteção; moderado; alto; muito alto e extremo, respectivamente (EPA, 2004; WHO, 2002). Este indicador é uma ferramenta simples e efetiva para auxiliar a população na adoção de medidas seguras em relação à exposição aos raios UV, especificamente para evitar queimaduras solares.

O termo “*Shadow Rule*” ou regra das sombras foi desenvolvido como uma diretriz de fácil compreensão para garantia da exposição segura ao sol. Esse método simples para proteção solar alerta que, se sua sombra for menor que sua altura, as precauções de proteção UV são necessárias. Ele reconhece a importância do caminho atmosférico na limitação da exposição aos raios UVB em altos ângulos zenitais (ou baixos ângulos de elevação solar). Há um rápido aumento (cerca de 55-57%) na irradiância efetiva do eritema à medida que o sol da manhã se move no céu de um ângulo zenital solar entre 50° a 40° (ou seja, de 40° a 50° de ângulo de elevação) e diminuição rápida em raios UVB à tarde à medida que o sol se põe (Holloway, 1992).

A campanha australiana de exposição solar, efeitos à saúde e proteção, denominada “*Slip, Slap, Slop, Seek ans Slide*” (*Slip on a shirt, Slap on a hat, Slop on protetor solar and*

Seek Shade) foi lançada pelo Cancer Council em 1981 e expandida com o programa SunSmart para combater as altas taxas de câncer de pele. De grande alcance e conscientização, o resultado da campanha mostrou que iniciativas para educação pública podem melhorar os comportamentos de proteção solar e reduzir as queimaduras solares. De acordo com a proposta, quando a sombras tem o mesmo comprimento que a altura, ou seja, ângulo solar igual a 45°, o Índice UV é de aproximadamente 4 e medidas de proteção são imprescindíveis (Silva, 2020; Walker *et al.*, 2022). O *Australian Bureau of Meteorology* tem reportado o Índice UV há mais de 20 anos, sendo rotineiramente incorporada em vários serviços de previsão meteorológica. Atualmente, os informativos e alerta podem ser vistos por meio do aplicativo *SunSmart Global UV*⁵, cuja abrangência envolve apenas cidades australianas (Nicholson *et al.*, 2019).

A exposição à radiação UVB (280–315 nm) é a principal fonte para a síntese de vitamina D decorrente da ação espectral ponderada pela resposta da pele humana. O processo para produção da síntese D ocorre quando um fóton de radiação UVB atinge as células da pele e a provitamina D (7-desidrocolesterol, 7-DHC) é convertida em pré-vitamina D, que é isomerizada por reações térmicas até a formação da vitamina D₃. Posteriormente, a D₃ é transportada através da corrente sanguínea para o fígado, onde é convertida em 25-hidroxitamina D (25(OH)D). Nos rins, é regulada a forma ativa da vitamina D, 1,25-dihidroxitamina D (1,25(OH)₂D). A medida padrão do status de vitamina D é a concentração de 25(OH)D no sangue, sem distinção entre D₂ obtida por dieta e suplementação, e D₃ por exposição solar (Maclaughlin; Anderson; Holick, 1982).

Os níveis de radiação UV variam de acordo com a faixa de comprimento de onda e a posição do sol no céu ou ângulo de elevação solar (AES). Este último é formado entre a linha do horizonte e o raio do sol e é definido em função da latitude e declinação solar. Seu ângulo complementar é o ângulo zenital solar - AZS (Madronich, 1993). A incidência de UV inicia logo após o nascer do sol, quando baixos ângulos de elevação solar (aproximados de 0°) são predominantes, mesmo com menor intensidade. Com o AES próximo de 90°, os

⁵ O aplicativo *SunSmart Global UV* apresenta alertas sobre proteção solar ao seu alcance, para que você saiba quando os níveis de UV podem danificar sua pele, causando câncer de pele está disponível no portal: <https://www.sunsmart.com.au/resources/sunsmart-app>

fótons UV percorrem distâncias mais curtas e têm baixa probabilidade de absorção pelo ozônio. À medida que esse ângulo se aproxima do zênite, a proporção de UVB aumenta em relação à banda UV banda larga (UVA+UVB), atingindo sua irradiância máxima ao meio-dia solar (Webb; Engelsen, 2008). McKenzie; Liley; Björn (2009) adotaram AES maior que 20° (zenitais abaixo de 70°) como referência para a incidência de UVB, enquanto Engelsen (2010) assume que a síntese de vitamina D se inicia com menor intensidade para ângulos maiores que 15° e mais evidentes por volta do meio-dia, quando atingem valores superiores a 75°. O modelo de Webb *et al.* (2011) considerou relevante o ângulo de elevação solar acima de 45°.

Apesar de não existir uma definição acordada internacionalmente para o status de vitamina D, há um consenso de que as concentrações séricas de 25-hidroxivitamina D aumentam em proporção à síntese cutânea, sendo atualmente representadas como melhor indicador para definição da vitamina D. Os níveis são expressos tanto em nanogramas por mililitro (ng/mL) quanto em nanomoles por litro (nmol/L), adotando como fator de conversão 1ng/mL equivalente a 2,5 nmol/L. Comumente se define um ponto de corte para 25(OH)D como um marcador para a supressão da vitamina D. De acordo com as recomendações alemãs da *Dachverband Osteologie* (DVO) e americanas do *National Institute of Health* (NIH) e do *Institute of Medicine, Food and Nutrition Board* (2010), os valores superiores a 20ng/ml são considerados adequados para a saúde, enquanto a *Endocrine Society* recomenda valores ≥ 30 ng/ml. Além disso, o NIH diferencia entre valores < 12 ng/ml, como severamente deficientes, e valores entre 12 e 20ng/ml, como inadequados ou deficientes. Mesmo sendo influenciados pelas estações do ano, estas faixas recomendadas não levam em consideração os aspectos sazonais.

A Sociedade Brasileira de Endocrinologia e Metabolismo classifica os níveis de vitamina D como deficiente, abaixo de 20 ng/mL, e desejáveis, acima de 20 ng/mL, sendo valores normais entre 20 e 60 ng/mL e ideais para população de risco entre 30 e 60 ng/mL, como idosos acima de 65 anos, gestantes, indivíduos com fraturas, pós-cirurgia bariátrica, em uso de fármacos que interferem no metabolismo da vitamina D, doenças osteometabólicas, diabetes tipo 1, doença renal crônica, insuficiência hepática, anorexia nervosa, síndrome de má absorção e câncer. Os registros acima de 100 ng/mL são considerados elevados com alto risco de intoxicação e de hipercalcemia (SBEM, 2020).

Embora haja consenso entre os dermatologistas em relação aos riscos dos raios solares, como queimaduras e doenças oculares, a literatura destaca a exposição moderada como suficiente para manter os níveis adequados de vitamina D. Especialistas acreditam que as condições ideais de exposição solar estejam entre 10 e 20 minutos e pelo menos três vezes na semana (Wacker; Holick, 2013). Recomenda-se exposição ao meio-dia (próximo ao horário solar) por ser o período mais favorável para estimular a síntese de vitamina D, sobretudo por apresentar maior incidência de UVB. Por isso, entre 10h e 15h é o horário ideal, sendo aconselhável a exposição inicial de braços, pernas ou costas sem fotoproteção (Grant; Bhattoa; Pludowski, 2017; Holick, 2011). Diante dos riscos de queimaduras solares, é essencial o equilíbrio entre a vitamina D e a proteção da pele. Para ser metabolizada, é preferível que nenhuma ação protetora impeça a exposição de algumas áreas do corpo, como braços, pernas, abdômen e costas, sendo indicada a proteção apenas do rosto e do pescoço (Holick, 2011). Após exposição, a aplicação do filtro solar é essencial. Mesmo sendo a principal fonte de produção desta vitamina, quando deficiente, também é indicada a complementação com uso de suplementos e a regulação da dieta alimentar.

Os maiores responsáveis pela produção cutânea de vitamina D são a intensidade e a qualidade espectral da radiação UV incidente. Tais parâmetros sofrem alterações em função de condicionantes temporais (ângulo de elevação solar), sazonais (período do ano) e espaciais que são determinadas pela localização geográfica (latitude), sendo ainda associadas à concentração de ozônio, à cobertura de céu (Mckenzie; Liley; Björn, 2009). Além destes, a eficácia da exposição solar é avaliada pela frequência, superfície do corpo exposta e fototipo de pele, considerados fatores determinantes sob condições de baixa irradiância.

O conceito do fototipo foi criado em 1975 e se refere especificamente à classificação da pele quanto à sensibilidade aos raios ultravioletas. A partir de estudos com voluntários em regiões do hemisfério Norte (20° a 45°N), os efeitos do bronzeamento e a resposta inflamatória à ocorrência de eritema cutâneo foram avaliados após exposição solar ao meio-dia. A Figura 4 ilustra a escala categórica *Fitzpatrick Skin Type* (FST) que varia do fototipo I (queima mais rápido sem bronzear) ao fototipo VI (nunca sofre queimaduras e sempre bronzeia). Amplamente utilizadas nos estudos de fotobiologia e na estimativa de doenças de pele, tais categorias foram medidas de acordo com a pigmentação constitutiva ou cor da pele

natural (Figura 4a), a tendência à queimadura (Figura 4b) e a capacidade de bronzeamento ou pigmentação induzida (facultativa) após exposição solar (Figura 4c) (Fitzpatrick, 1988).

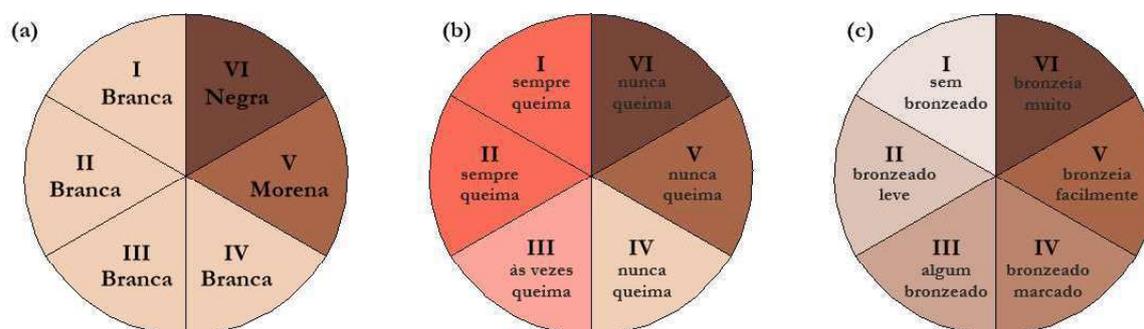


Figura 4 - Definição dos fototipos: (a) pele constitutiva, (b) 24h e (c) 7 dias após exposição solar. (Fonte: Adaptada de Fitzpatrick (1988)).

É fundamental observar que a exposição solar não concede benefícios uniformes à população. A idade, o sexo e o fototipo cutâneo alteram a eficácia com que a radiação UV na pele produz vitamina D. A faixa etária e o fototipo da pele são os atributos pessoais que podem alterar a capacidade da pele de sintetizar hormônios D. Enquanto os mais idosos têm mais suscetibilidade apresentando baixo status de vitamina D, principalmente população de alta latitude, e pessoas de pele escura, a pele branca em baixas latitudes tem risco de queimaduras solares e câncer. Mesmo com a frequência de pele clara em Pequim, China, que exigiria menor tempo de exposição para a produção de vitamina D, o uso de filtro solar e uma menor área de exposição cutânea resultaram em supressão da 25(OH)D, especialmente em pessoas mais velhas (Ning *et al.*, 2016). Por outro lado, a população africana com alto nível de melanina, que requer alta exposição solar, obtém maiores níveis de 25(OH)D (Durazo-Arvizu *et al.*, 2014). Essas evidências apoiam a suposição de que o tipo de pele, como um fator de resposta à síntese de vitamina D, não pode ser avaliado isoladamente.

A produção de vitamina D foi avaliada em função da latitude, estação do ano e tipo de pele, no período da primavera (março) e do meio-dia solar (AES = 48°) para o contexto de Boston (42,5°N). Utilizando a ferramenta FastRT UV, foi simulado o tempo de exposição suficiente para uma dose padrão de vitamina D – 1000UI/dia (Standard Vitamin D Dose or SDD) para quatro latitudes, sob a incidência de UVB em uma superfície horizontal. Para as baixas latitudes (11,5°N) e pele de fototipo I exposta às 9 horas, estimaram que a síntese ocorre após 18 minutos no inverno e 9 minutos no verão. Para peles do tipo IV, o tempo dobra para 35 minutos e 19 minutos nas mesmas estações. Acima de 60°N, recomenda-se um tempo de exposição mais longo (Webb; Engelsen, 2008).

Mckenzie; Liley; Björn (2009) avaliaram ângulo zenital solar, Índice Ultravioleta (IUV), Regra das Sombras (*Shadow Rules*) e a razão entre radiação UV ponderada para síntese D e para eritema no contexto de Lauder, Nova Zelândia (45° S, 170°L e altitude 370m). Avaliou-se o tempo de exposição solar suficiente para atingir a dose diária de vitamina D (1000UI) sem queimaduras solares na pele fototipo II. Observou-se que a variável “percentual de pele exposta” é inversamente proporcional ao tempo necessário para produzir vitamina D.

Ao meio-dia solar durante o período de verão (AZS <30° ou AES >60°), foi necessário apenas 1 minuto e 10 minutos para 100% e 10% do corpo exposto ao sol, respectivamente, enquanto os danos cutâneos se iniciaram somente após 18 minutos. Para outros fototipos (Fitzpatrick, 1988), ocorreu redução de ± 0,7 para o tipo I, o dobro para o tipo IV e de 5 a 10 vezes para os tipos V a VI. O efeito da regra de sombra, que corresponde à relação entre a altura humana e a dimensão de sua sombra no plano horizontal - tangente à AZS - demonstrou que quanto menor o fator sombra, maior o IUV e menor o tempo de sol necessário para sintetizar vitamina D (Tabela 2).

Tabela 2 – Alcance do Índice UV e tempo de exposição correspondente a queimadura e fotossíntese de vitamina D para pele de fototipo II. (Fonte: Mckenzie *et al.*, 2009)

IUV	Tempo para ocorrência de queimadura	Tempo para ocorrência de síntese de vitamina D (1000 UI)	
		100% de área de pele exposta	10% de área de pele exposta
1	180 minutos	20 minutos	200 minutos
2	120 minutos	7,7 minutos	77 minutos
3	60 minutos	4,3 minutos	43 minutos
4	45 minutos	3,0 minutos	30 minutos
5	36 minutos	2,3 minutos	23 minutos
6	30 minutos	1,9 minutos	19 minutos
7	26 minutos	1,5 minutos	15 minutos
8	22 minutos	1,3 minutos	13 minutos
9	20 minutos	1,1 minutos	11 minutos
10	18 minutos	1,0 minutos	10 minutos
11	16 minutos	0,9 minutos	9 minutos
12	15 minutos	0,83 minutos	8,3 minutos
13	14 minutos	0,8 minutos	8 minutos

Nas últimas décadas, houve um aumento progressivo e uma grande preocupação relacionada à quantidade de radiação UV que atinge a superfície da Terra. Devido aos danos à camada de ozônio da estratosfera, aumenta-se os efeitos nocivos para os seres vivos, uma vez que

se trata do único gás capaz de filtrar a radiação ultravioleta na faixa B. Por outro lado, ao evitar exposições frequentes, a deficiência de vitamina D tornou-se um problema de saúde mundial (Hosseini-Nezhad; Holick, 2013). Sob esta ótica, os documentos normativos são essenciais para orientação quanto à exposição adequada ao sol atrelada à adoção de um estilo de vida saudável. Algumas localidades como Austrália (Australia, 2009), Nova Zelândia (Ministry of Health and Cancer Society of New Zealand, 2012) e países do Reino Unido (Nice Guideline, 2016) já adotam medidas de exposição solar que orientam sobre os potenciais danos e os efeitos benéficos à saúde.

Devido à sua grande extensão territorial entre as latitudes 4°N a 34°S, o Brasil é considerado referência tropical com alta incidência de radiação solar e faz parte desse cenário epidemiológico com níveis elevados de deficiência e insuficiência de vitamina D, especialmente nas regiões sul e sudeste (Fontanive *et al.*, 2020; Pereira-Santos *et al.*, 2018; Santos *et al.*, 2012). Para avaliar estes impactos, a Organização Mundial da Saúde recomenda o monitoramento da incidência de UV para orientação por meio de órgãos de saúde pública (WHO, 2002). Iniciativas governamentais e não-governamentais brasileiras, ainda que restritas, têm sido colocadas em ação para aumentar a conscientização da população sobre os comportamentos de fotoproteção (Projeto de Lei 5734/2013, 2013; Schalka; Steiner, 2014). No entanto, apesar de sua relevância, o levantamento da radiação UV ainda é pouco frequente na maioria das estações meteorológicas nacionais, uma vez que a aquisição de instrumentos com alta acurácia são onerosos e requer manutenção frequente.

Como alternativa para suprir essa escassez, levantamentos nacionais têm relacionado a radiação UV combinada (UVA e UVB) e a radiação de banda larga global (280 a 2800nm), que é uma medida mais facilmente encontrada em estações meteorológicas automáticas. Investigações brasileiras mostraram que a irradiância UV horária constitui 5,2% da irradiância solar global com métricas de desempenho satisfatórias com $R^2 = 0,95$ e erros MBE = 3,09% e RMSE = 15,80% para a cidade de Recife/PE (Leal, 2011; Tiba; Leal, 2012, 2017). Essa estimativa reduziu para 2,8% em Maceió/AL com $R^2 = 0,99$ (Porfirio *et al.*, 2010) e 4,1% em Botucatu/SP com $R^2 = 0,97$ e erros MBE = -1,67 e RMSE = 9,94 (Escobedo *et al.*, 2009). Os estudos internacionais são mais evidentes no Hemisfério Norte, especialmente em latitudes médias e altas (Canada; Pedros; Bosca, 2003; Habte *et al.*, 2018; Mehnati *et al.*, 2021).

2.3. Direito ao sol e o meio urbano: Indicadores e métodos de avaliação da obstrução do céu

Não há um consenso global sobre o direito ao sol e a adoção de estruturas regulatórias de planejamento urbano é necessária, sobretudo as que fomentam o acesso à radiação solar direta. Boubekri (2008) propõe três diretrizes para elaboração de legislação destinada à luz natural em ambientes construídos: **o acesso solar em período específico**, com base em leis de ocupação do solo e definição de altura máxima dos edifícios e suas divisas, **o dimensionamento das aberturas e os níveis ideais de luz natural no interior** dos ambientes. Segundo o Comitê Internacional de Iluminação CIE S-026 (2018), o contato com a luz natural deve ser dial, ainda que não estabeleça um padrão mínimo para exposição. Ao passo que os hábitos diários da população urbana contemporânea restringem o acesso ao sol, a permanência prolongada em ambientes fechados, com ou sem aberturas, impactam na salubridade com o aparecimento de enfermidades, comumente de cunho psicológico e comportamental.

Alguns países apresentam medidas que visam garantir exposição solar mínima nos edifícios. Na Alemanha, o Regulamento DIN 5034-1 (2011) exige que, pelo menos, uma janela de uma habitação tenha acesso solar mínimo de 1 h em 17 de janeiro (inverno) e 4 h em 21 de março e 21 de setembro (equinócios). A Norma CSN 734301 (2004) e o Regulamento 268/2009 para residências na República Tcheca atribui horas de sol com o mínimo de 1,5 h em 01 de março ou como média por dia no período de 10 de fevereiro a 21 de março (Darula; Christoffersen; Malikova, 2015). Já na Polônia, o Regulamento de Infraestruturas, instituído em 2002, requisita que os apartamentos recebam 3 h de luz solar de 21 de março a 21 de setembro entre 7h e 17h (Sokol; Martyniuk-Peczec, 2016).

O *Estonian Centre for Standardisation* regulamenta que novas edificações na Estônia não podem interferir nas existentes em mais de 50% do acesso solar direto e devem receber um mínimo de 2,5 horas de luz em, pelo menos, um cômodo. Ambas as condições são obrigatórias para todos os dias no período de 22 de abril a 22 de agosto (Luca, 2017). Diferentes destes, os documentos normativos e os regulamentos técnicos brasileiros ainda não exploram as particularidades do acesso ao sol relacionadas à saúde. As regras edilícias e urbanas, invariavelmente, são genéricas e não têm como base o atendimento das necessidades de acesso à luz solar com impacto na salubridade.

Em um contexto urbano denso, a obstrução do céu ocasionado pela presença de grandes volumes construídos é relativamente alta, podendo reduzir significativamente a disponibilidade de luz natural e bloquear parcialmente ou totalmente o contato com a radiação solar direta (Hopkinson; Petherbridge; Longmore, 1966; Ng, 2005). O sombreamento causado pelas obstruções e a consequente diminuição do acesso ao sol e da iluminação natural no meio urbano ocorrem tanto em espaços abertos quanto nas fachadas e nas áreas internas dos edifícios (Scalco; Pereira, 2016). Sob os aspectos psicológicos, a redução da visão do céu pode comprometer a produtividade e aumentar a percepção de confinamento (Zhang *et al.*, 2012).

Por outro lado, uma maior porção de céu visível significa maior exposição à radiação solar. A insolação em excesso contribui para o superaquecimento e a ocorrência de ofuscamento nas edificações, que, conseqüentemente, gera aumento do consumo de energia, por recorrer a fontes artificiais de acondicionamento e iluminação. No ambiente urbano, o excesso de insolação gera ambientes desconfortáveis à presença humana, além de dificultar e reduzir as possibilidades de deslocamento de baixo impacto ambiental, como ciclismo, caminhada, etc. Entretanto, diversas propostas podem ser adotadas para contornar as problemáticas destacadas. O controle da radiação solar em excesso pode ser feito na própria edificação. Normas e leis podem recomendar ou determinar o uso de estratégias de sombreamento nas edificações, assim como, políticas públicas de arborização e proteção solar nos espaços públicos e semipúblicos podem ser implantadas. O excesso de radiação pode ser controlado, porém, o bloqueio da luz solar decorrente da obstrução da visão do céu por edifícios é permanente. Nesta perspectiva, a avaliação da exposição de sol e do céu é primordial, principalmente como parâmetro da qualidade ambiental em espaços urbanos, em complemento à análise dos impactos das edificações no entorno (Scalco, 2010), uma vez que estão intimamente relacionadas com a disponibilidade de luz e de radiação solar.

Em termos de avaliação de exposição de céu, a literatura sugere alguns indicadores que visam garantir à edificação condições mínimas de luz natural e de acesso solar com base em ângulos horizontais e verticais de obstrução externa, são eles: Indicador de altura admissível ou *Permissible height indicator* (Hopkinson; Petherbridge; Longmore, 1966), Linha de não-visão do céu ou *No-skyline indicator* (Littlefair, 2001a, 2011b), Área de visão desobstruída ou *Unobstructed Vision Area Method* (Ng, 2003) e Janela de céu preferível

(Leder; Pereira; Claro, 2008). Um indicador amplamente utilizado é o Fator de céu visível ou *Sky View Factor* (SVF), que representa a magnitude de exposição ao céu, sendo comumente definido pela relação do ângulo de céu visível de um determinado ponto com o ângulo de céu hemisférico (Chapman; Thornes, 2003). Zhang *et al.* (2019) denomina este conceito como medida geométrica ou *Sky Exposure Factor* (SEF).

Para estudos geográficos e climatológicos, o SVF está relacionado com a proporção entre a radiação recebida por uma superfície plana pela radiação total recebida por todo hemisfério, onde cada porção de céu é ponderada pelo cosseno do ângulo zenital solar e com maior peso próximo ao eixo vertical no zênite (Johnson; Watson, 1984; Oke, 1981). Em superfícies horizontais, é representado por um valor adimensional entre 0 e 1, denominado como obstruído e desobstruído, respectivamente. Já nas verticais, o valor máximo atinge 0,5, correspondente a uma fachada totalmente desobstruída vista apenas pela metade da abóbada celeste. O SVF tem sido utilizado como parâmetro em pesquisas que correlacionam a porção de céu e o fenômeno de ilha de calor (Oke, 1981), em estudo de clima urbano (Daramola; Balogun, 2019; Mirzaee *et al.*, 2018) e na área de botânica.

Para análise do número de horas de sol, um dos indicadores mais utilizados é o Envelope Solar (*Solar Envelope*). Desenvolvido por Ralph Knowles na década de 80, consiste nos limites de gabarito (envoltória tridimensional) e distribuição de massas (volume) para garantia da quantidade necessária de insolação direta durante o dia ao longo do ano. Este recurso assegura acesso solar em superfícies verticais vizinhas e a possibilidade de adoção de estratégias passivas como a disponibilidade de luz natural e de radiação direta (Knowles, 1980a, 2003b), sendo eficientes em contexto de baixa densidade edilícia e com limitação em ambientes urbanos adensados.

Dada a importância da disponibilidade solar no ambiente construído, medidas avaliativas são propostas com intuito de identificar melhores alternativas para configuração urbana. Os indicadores coletados para esta revisão apresentaram derivações do conceito de envelope solar, sendo: *Solar Bounding Box*-SBB (Raboudi; Belkaïd; Saci, 2012; Raboudi; Saci, 2013), *Residential Solar Block Envelope*-RSB *Envelope* (Vartholomaios, 2015), *Parametric Solar Envelope*-PSE (Capeluto; Plotnikov, 2017), *Subtractive Solar Envelope* (Luca, 2017) e *Reverse Solar Envelope*-RSE (Luca; Dogan; Sepúlveda, 2021).

Os indicadores sugerem diferentes técnicas para definição da forma construída, desde métodos descritivos, que demandam mais tempo de execução, como também os computacionais, cujos resultados são extraídos mais rápidos, mesmo se tratando de contexto urbano com geometrias complexas. Além da possibilidade de construção de superfícies iso-solares usando Modelo Digital de Terreno e de Elevação (MDT e MDE), outras ferramentas automatizam o processo de construção do envelope solar como softwares: CalcSolar (Noble; Kensek, 1998), SustArc (Capeluto; Shaviv, 1999) e plugins com possibilidade de parametrização (DIVA for Rhino, 2021).

O *Solar Bounding Box* (SBB) é um gerador morfológico de regras de controle solar avaliado como instrumento de planejamento urbano (Figura 5a). Este indicador envolve diretrizes urbanas para construção de envelope solar, preservando o direito ao sol e em conformidade com as características climáticas da região. A delimitação espacial do volume segue os requisitos regulatórios da cidade como as normas de implantação: limites de altura, recuos e distância entre edifícios, taxa de ocupação e índice de aproveitamento (Raboudi; Belkaïd; Saci, 2012).

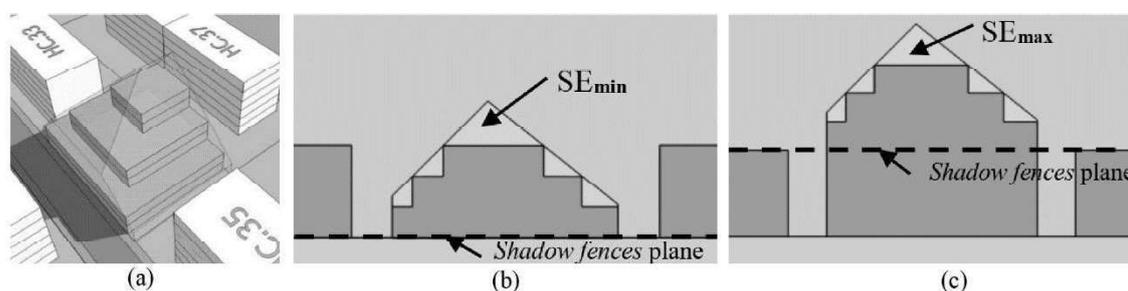


Figura 5 – Esquema de Solar Bounding Box. (Fonte: Raboudi; Saci, 2013)

Para execução do SBB, um plano de sombreamento (*shadow fences plane*) é determinado em função da quantidade de horas de incidência solar desejada para fachadas e cobertura, podendo variar de acordo com os limites permitidos pela normativa urbana, que representam fatores de alteração da densidade construída (taxa de ocupação e índice de aproveitamento). Para garantia de acesso ao sol nos pavimentos inferiores, o plano de sombreamento é projetado no solo, resultando em um envelope solar mínimo (SE_{min} – Figura 5b) com incidência direta do sol tanto nas fachadas como nas coberturas. Nos níveis mais altos, o plano de sombreamento é delimitado no nível das coberturas, onde inicia o escalonamento do envelope solar máximo (SE_{max} – Figura 5c), possibilitando o acesso sem

interferir na incidência da radiação nos telhados dos edifícios vizinhos (Raboudi; Saci, 2013).

O *Residential Solar Block* é um método para geração de formas urbanas (Okeil, 2010), cuja definição combina o envelope solar tradicional (Capeluto; Shaviv, 1999; Knowles, 1980a, 2003b) com abordagem de modelo adequada para diferentes contextos climáticos. A técnica permite o desenvolvimento de blocos urbanos compactos com alto potencial solar passivo. Como este método fornece os princípios básicos de projeto e carece de técnicas para sua aplicação em ambientes urbanos adensados, foi avaliada a possibilidade de adaptação do método com a utilização de ângulo de corte em relação à largura da rua, tendo como referência o movimento aparente do sol, a determinação das horas de incidência solar, a orientação e a forma do elemento construído. Ilustrado na Figura 6, o volume produzido é denominado como *Residential Solar Block Envelope* ou *RSE Envelope* (Vartholomaios, 2015).

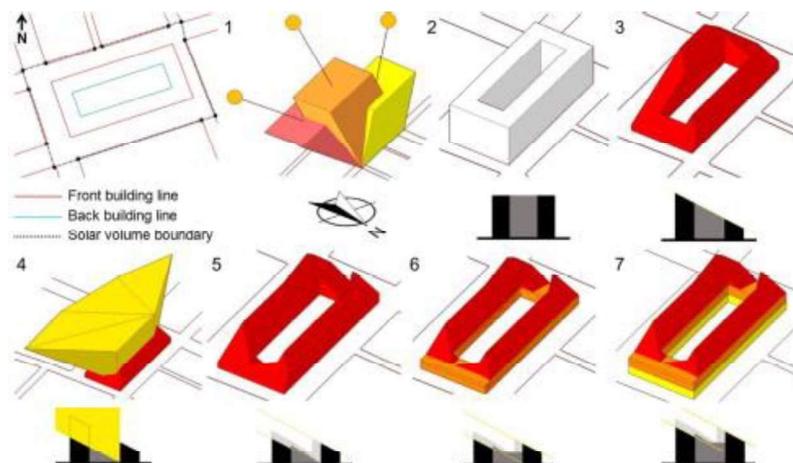


Figura 6 – Etapas de construção do RSB Envelope. (Fonte: Vartholomaios, 2015)

Outros autores propuseram uma variação do modelo SustaArc (Capeluto e Shaviv, 1999), definido a partir de duas configurações: o envelope de direito solar (*Solar Right Envelope-SRE*), que determina a altura máxima de um volume construído sem violar o direito ao sol e garantindo um mínimo de insolação em período crítico, e o envelope de captação solar (*Solar Collection Envelope-SCE*), que atribui limite mínimo de altura a partir da qual um novo volume construído terá acesso solar permitindo maior insolação. Com a junção dos modelos SRE e SCE (Figura 7a), foi desenvolvido o *Solar Volume* (SV) o qual avalia a disponibilidade solar nos edifícios em horas, dias e meses específicos, em um dado contexto construído e sem geração de impacto pelas obstruções (Capeluto, 2003).

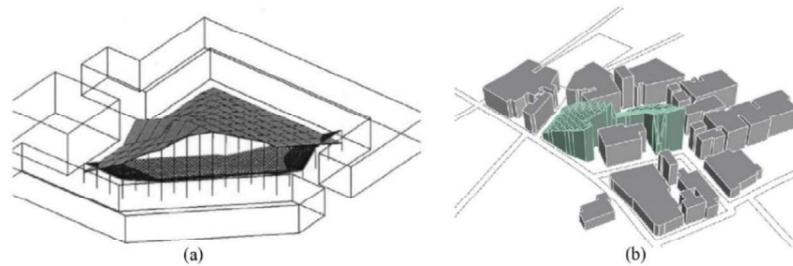


Figura 7 – Construção do Solar Volume. (Fonte: Capuleto; Shaviv, 1999; Capuleto; Plotnikov, 2017)

Expandindo a pesquisa apresentada anteriormente, foi proposto um indicador que determina alturas máximas de construção em um ambiente urbano sem impedir o direito ao sol. A partir de parâmetros urbanos variados, modelos hipotéticos são construídos e avaliados segundo dados meteorológicos coletados de arquivo climático do tipo *EnergyPlus Weather* (EPW). Conforme apresentado na Figura 7b, originou o gerador de envelopes solares paramétricos denominado *Parametric Solar Envelope* – PSE (Capuleto; Plotnikov, 2017). Para tornar o método mais acessível, uma ferramenta de código aberto foi desenvolvida no plugin Ladybug (Grasshopper) e implementada no software Rhinoceros.

O *Reverse Solar Envelope* avança os estudos iniciais sobre o método subtrativo de geração de envelopes solares, o *Subtractive Solar Envelope* (Luca, 2017), definido pela eliminação de módulos de um arranjo tridimensional os quais seguem os ângulos dos raios de incidência solar na envoltória (Figura 8a). Essa pesquisa propõe um método alternativo com o aumento do volume máximo construído, a partir da subtração de células tridimensionais (Figura 8b) quando fachadas circundantes bloqueiam o acesso solar direto nas janelas (Luca; Dogan; Sepúlveda, 2021).

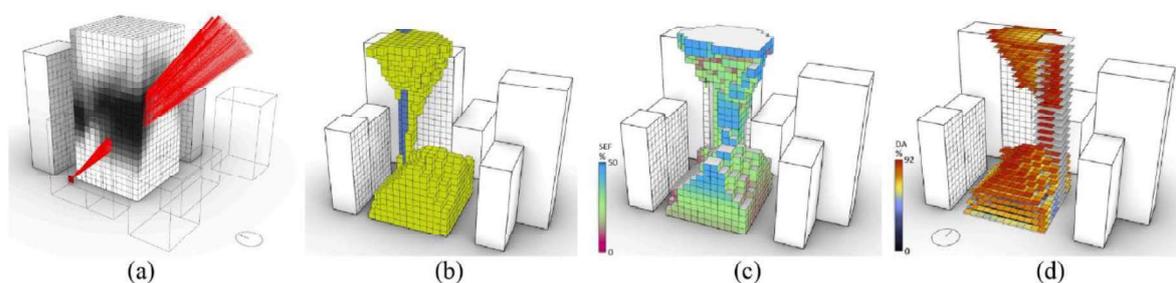


Figura 8 – Etapas de construção do Reverse Solar Envelope. (Fonte: Luca; Dogan; Sepúlveda, 2021)

Esse indicador é recomendado para qualquer contexto urbano, sendo também eficiente em ambientes com alta densidade construída. Ainda, se adapta às restrições de códigos e normativas urbanas quanto ao número de horas de luz solar, seja durante dias específicos ou porcentagem das horas durante um período. O padrão de iluminação e de radiação define o direito ao acesso solar para edifícios existentes como também para novas instalações. Além da disponibilidade solar, o método também permite a realização de simulações para quantificar a obstrução do céu em percentual de exposição (Figura 8c) e a autonomia da luz natural - DA (Figura 8d) (Luca *et al.*, 2021).

A incidência da radiação solar sobre as superfícies varia de acordo com a complexidade da morfologia e das interações com vários componentes do ambiente urbano. Comumente, a forma urbana é definida com base em documentos regulatórios que estabelecem critérios para afastamentos ou recuos (distância entre limite da edificação e do terreno), gabarito (altura máxima dos edifícios), taxa de ocupação e índice de aproveitamento do solo (Scalco, 2010). Outros conceitos como densidade urbana, homogeneidade, sinuosidade, compacidade, rugosidade, porosidade, prospecto médio das ruas (cânion urbano), permeabilidade e percentual de espaços abertos também podem ser incorporados em códigos e regulamentos, uma vez que também interferem na disponibilidade solar em áreas urbanas (Martins *et al.*, 2016). Os impactos da morfologia na exposição celeste e solar podem revelar como a configuração espacial afeta a qualidade do ambiente urbano por meio do sombreamento gerado pelas obstruções e do bloqueio do acesso ao sol (Wai; Yu; Lam, 2015). Aliados aos parâmetros morfológicos, a utilização de indicadores é imprescindível para avaliação da forma urbana e da distribuição temporal da luz natural e da radiação solar.

A relação entre a morfologia urbana e o desempenho ambiental vem sendo investigada a partir de diferentes perspectivas. Para avaliação da disponibilidade solar, os parâmetros morfológicos adotados nas pesquisas coletadas foram divididos em duas categorias: a que representa medidas correspondentes ao elemento construído – o edifício, e a que envolve o ambiente urbano em sua totalidade com padrões típicos estabelecidos por códigos de urbanismo, como os limites de ocupação, densidade construída e vazios urbanos. Apesar de não serem indicadores morfológicos, o *Sky View Factor-SVF* e o *Sky Exposure Factor-SEF* são comumente interpretados como tal por estar diretamente relacionados ao acesso solar e a obstrução do céu. Os fatores mencionados são influenciados pela morfologia urbana, tanto por edifícios vizinhos quanto pela vegetação arbórea.

Nesse contexto, os indicadores desempenham um papel fundamental na avaliação do impacto das obstruções (Zhang *et al.*, 2012).

Sabe-se que as áreas urbanas têm impactos nas alterações climáticas dependendo da contribuição dos elementos construídos presentes no recorte. Uma das modificações de grande efeito está relacionada com o sombreamento urbano causado pelas obstruções. Para avaliar a qualidade e o bom planejamento de áreas sombreadas no meio urbano é importante averiguar alguns fatores, tais como: (1) radiação refletida pelas superfícies de entorno, materiais e o albedo do solo; (2) se são caracterizadas por sombra natural ou construída; (3) a visão de céu e a morfologia urbana. Este último geralmente é calculado com o indicador *Sky View Factor* (SVF), sendo comumente utilizado para descrever a geometria urbana (Gál; Unger, 2014; Oke, 1981). A literatura apresenta alguns métodos para estimativa do fator de céu no meio urbano, dividido em: Método geométrico, Método de fotografia hemisférica (olho de peixe), Método GIS/GPS, Simulação com base em modelos digitais de superfícies e modelos tridimensionais e o mais recente com a abordagem *big data* através de imagens digitais a partir do recurso do *Google Street View* (GSV).

Os métodos geométricos calculam o SVF em função do ângulo entre uma superfície do solo e o topo dos edifícios circunvizinhos (Johnson; Watson, 1984; Okeil, 2010). Estes são alternativas para cálculo em cânions de ruas simples e regulares sem a presença de vegetação. Já o método fotográfico com imagem hemisférica (Figura 9a) foi inicialmente aplicado em climatologia urbana (Steyn, 1980), introduzindo o conceito de projeção equiangular com correção geométrica de imagens olho de peixe em cânions urbanos. Este método manual captura uma matriz de pixels de cada imagem, distinguindo a porção celeste (pixel 255 - branco) e a porção obstruída (pixel 0 - preto) (Steyn *et al.*, 1986) (Figura 9b).



Figura 9 – (a) Imagem hemisférica; (b) Conversão em pixel 0 e 255; (c) Inserção de 36 anéis concêntricos. (Fonte: Adaptado de Middel *et al.*, 2017)

O conceito parte da divisão da imagem em uma grade polar formada por anéis concêntricos (padrão $n = 36$ – Figura 9c) com larguras iguais e da soma da contribuição de céu visível de cada anel (Chapman; Thornes; Bradley, 2001; Middel *et al.*, 2017), com base na Equação 01. Os valores dos anéis são somados para a estimativa do SVF total. Algumas soluções permitem rastreamento dos pixels em softwares com auxílio de imagens digitais que automatizam o cálculo do SVF, a exemplo do *RayMan* (Matzarakis, 2018).

$$SVF = \frac{\pi}{2n} \sum_{i=1}^n \sin\left(\frac{\pi(2i-1)}{2n}\right) \left(\frac{p_i}{t_i}\right) \text{ (Equação 01),}$$

Onde:

p_i/t_i é a razão entre o número de pixels de céu pelo total de número de pixels no anel i .

Além do método geométricos e de fotografias hemisféricas, também é possível estimar o SVF através da obtenção de dados de visibilidade de satélites com um receptor GPS (Sistema de Posicionamento Global), podendo ser realizado cálculo e aproximação de SVF em tempo real (Chapman; Thornes; Bradley, 2001; Gál *et al.*, 2007). Apesar de precisos, a aplicação destas técnicas exige procedimentos manuais, medições de campo e maior tempo de processamento, sendo limitados quando necessário aquisição de dados em larga escala. Quanto às simulações, são explorados em ambientes artificiais com modelagem morfológica urbana e o uso de técnicas de mapeamento digital, fornecendo avaliações rápidas em grandes áreas. Muitas extensões/plugins empregam banco de dados de construção 3D com base em GIS, a exemplo do SVFEngine, 3DSky e ArcView SVF (Gal; Unger, 2014).

Recentemente, o método de captura de ambientes urbanos foi desenvolvido com uso de imagens panorâmicas de acesso aberto, como *Google Street View* (GSV). Este método se baseia na técnica de conversão geométrica de imagens panorâmicas em imagens hemisféricas. Com um banco de dados de imagens GSV disponível, é possível compor imagens hemisféricas do cânion de rua e calcular o SVF de um recorte urbano em larga escala (Li; Ratti; Seiferling, 2018). Como os métodos tradicionais utilizam processamento de imagens mais demorados, com a abordagem *big data* é possível estimar automaticamente SVF em um número maior de imagens GSV com ferramentas de rede neural de código aberto. Apesar das vantagens em relação à alta velocidade e a obtenção do SVF em grande escala, requer conhecimento técnico mais aprofundado, o que, em alguns momentos, seu uso é inviável (Liang *et al.*, 2017).

O SVF é um dos mais utilizados para classificar obstruções resultantes do auto-sombreamento do edifício e das sombras proveniente de geometrias urbanas adjacentes, e ainda auxiliar na avaliação de variáveis ambientais como a incidência de radiação solar (Figura 10a). No entanto, medir apenas o SVF, muitas vezes, não representa fielmente os bloqueios da radiação solar em sua totalidade (Calcabrini *et al.*, 2019; Lan; Gou; Xie, 2021), uma vez que as sombras podem abranger zonas de menor impacto no caminho aparente do sol. Outros indicadores com base em visão de céu foram introduzidos com finalidades distintas, tais como: o Fator de Cobertura Solar ou *Sun Coverage Factor* – SCF (Calcabrini *et al.*, 2019) e Fator Universal de Céu Visível (*Universal Visible Sky Factor* - uVSF). O primeiro determina o efeito da incidência solar anual em um determinado local e definido como a área visível do céu sob a projeção do caminho aparente do sol (Figura 10b) (Lan *et al.*, 2021).

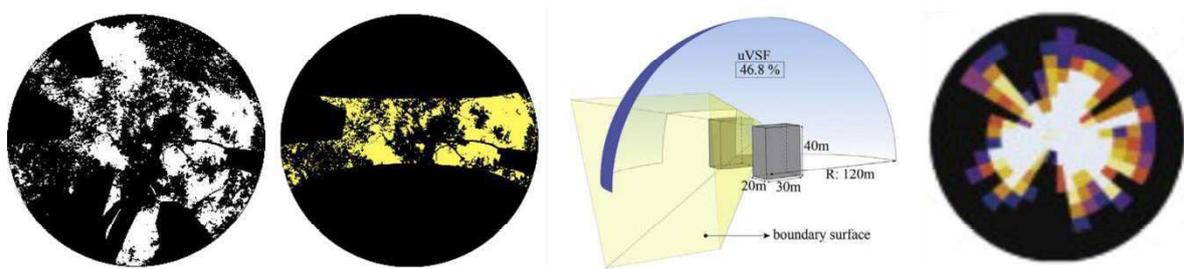


Figura 10 – (a) Máscara de sombra - SVF; e (b) Máscara solar – SCF e sobreposição da carta solar de João Pessoa/PB; (c) Definição do uVSF; (d) SVF direcional. Fonte: Lan; Gou; Xie (2021); Yi; Kim (2017); Musselman *et al.* (2012).

Já o uVSF determina a área de projeção real dos obstáculos, no plano vertical, em um modelo hemisférico tridimensional (Figura 10c). Essa técnica aumenta a precisão da proporção do céu visível sem distorcer obstruções e pode ser adotado em morfologias mais complexas das formas dos edifícios circundantes e de layouts urbanos (Yi; Kim, 2017). Para avaliação de taxas de ablação de neve em pesquisas florestais, alguns estudos aplicam o indicador SVF na análise da distribuição espacial da vegetação. López-Moreno e Latron (2008) quantificaram fatores de céu representados em círculos concêntricos de ângulos zenitais iguais (10°) e Musselman *et al.* (2012) apresentaram o *Directional SVF*, cuja estimativa divide o céu em faixas individuais (Figura 10d).

Ambos, adotaram o conceito geométrico por contagem total de pixels em regiões de céu e utilizaram o software de processamento de imagens *Gap Light Analyzer* (GLA) para conversão de imagens hemisféricas originais para versão monocromática. O software de simulação Rayman foi utilizado para determinar SVF, ou seja, quanto do céu é visível a partir de diferentes pontos em uma área de estudo. Desenvolvido pela *Chair for Environmental Meteorology e Climatology of the*

Albert-Ludwigs-University Freiburg, o programa pode simular índice de conforto térmico e possibilita a visualização da máscara de sombras (*shadow mask*) e o cálculo da duração da luz solar (*Sunshine duration*). Uma das principais aplicações do Rayman é a determinação do indicador Sky View Factor (SVF), podendo ser executado com base em imagens hemisféricas ou em um raster topográfico com arquivos de vetores ou por *shapefiles*.

Os modelos baseados em Sistemas de Informações Geográficas (SIG) têm forte capacidade de representação espacial do mundo real para fins de simulação e estimativa da radiação incidente, comumente utilizados em estudos de viabilidade para instalação de coletores solares e placas fotovoltaicas. Dois casos investigados na cidade de Lisboa analisaram a interferência do sombreamento do entorno e da exposição de céu (*Sky View Factor* - SVF) no potencial de radiação solar das superfícies dos edifícios. As representações dos recortes urbanos foram obtidas por modelo digital de elevação - MDE (Figura 11a) (Redweik; Catita; Brito, 2013) e modelo digital do terreno - MDT (Figura 11b) (Machete *et al.*, 2018).

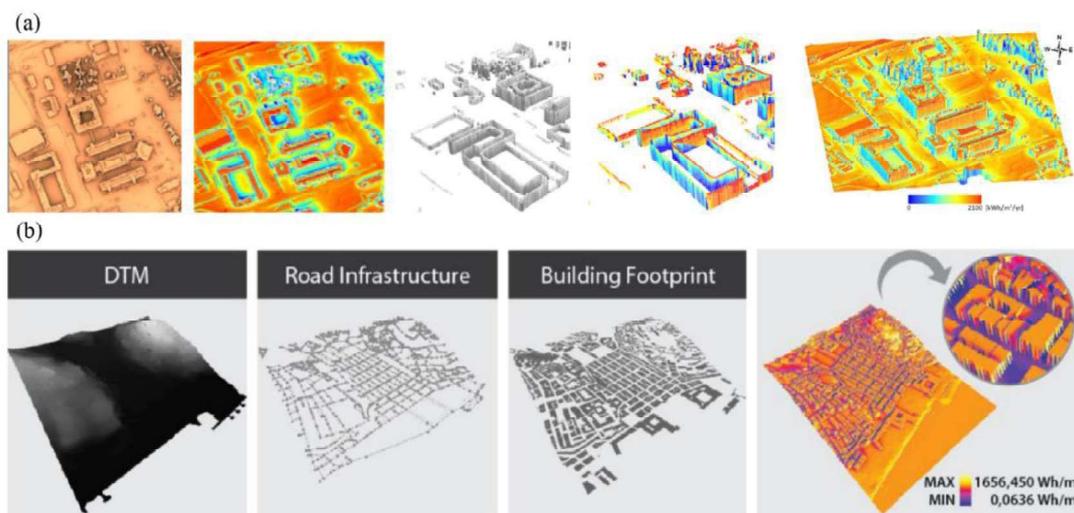


Figura 11 – (a) Modelo Digital de Elevação (MDE) e (b) Modelo Digital do Terreno (MDT). (Fonte: (a) Redweik; Catita; Brito (2013) e (b) Machete *et al.* (2018))

Ambientes urbanos com entorno edificado apresentaram um efeito notável na radiação solar das fachadas nos períodos de inverno e verão com maior exposição solar nas fachadas leste e oeste (Redweik; Catita; Brito, 2013). O potencial solar se mostrou altamente dependente do ambiente construído e da topografia do local, sendo este o fator de maior impacto. Comparando simulações de um edifício isolado com modelos inseridos em contexto urbano com topografia e adição de edifícios de entorno, foi encontrada uma diferença média da radiação na ordem dos 30% (Machete *et al.*, 2018).

Em relação à densidade construída e às interferências da exposição de céu nas fachadas, Zhang *et al.* (2012) propuseram uma metodologia em que assume o fator de céu como variável geométrica, onde cada porção de céu é considerada igualmente importante, sem ponderações, definindo por *Sky Exposure Factor* (SEF). O critério adotado para avaliação de desempenho das fachadas foi com o SEF variando entre 0,2 e 0,4 como estado preferível/desejável. A partir desta condição, um indicador de qualidade de exposição de céu, denominado Área bruta de fachada normalizada (*Gross Floor Area Normalized Facade Area* - GFA), foi sugerido, representando a proporção entre a área total de fachada com SEF preferível ($0,2 < SEF < 0,4$) e a área total do terreno.

A distribuição do SEF nas fachadas variou em função da tipologia dos edifícios e da configuração do ambiente urbano. Para os contextos com maior taxa de ocupação e menor gabarito, como os casos de Barcelona (Figura 12a) e em Paris (Figura 12b), a área de fachada com SEF desejável apresentou maior indicador com GFA correspondente à 0,206 e 0,141, respectivamente, em virtude da presença do pátio central que possibilitou o aumento do percentual de área de fachada e conseqüentemente, maior porção de céu visível.

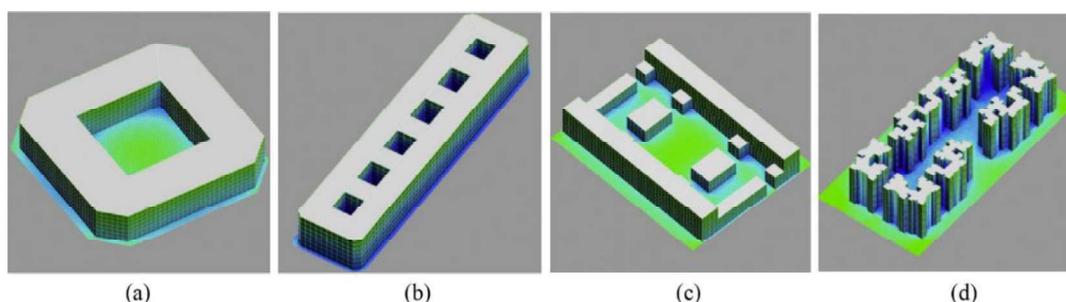


Figura 12—*Sky Exposure Factor* em tipologias distintas: (a) Barcelona, (b) Paris, (c) Amsterdã e (d) Singapura. (Fonte: Zhang *et al.*, 2012)

Já o recorte urbano com edifícios lineares, com menor taxa de ocupação e variação de gabaritos, como em Amsterdã (Figura 12c), atingiu exposição solar preferível em 50% das fachadas e GFA de 0,305. No panorama asiático, como a cidade de Singapura (Figura 12d), as tipologias com gabaritos uniformes e acima de 15 pavimentos obtiveram áreas de fachada desejável com média de 35% e GFA variando de 0,293 a 0,353 (Zhang *et al.*, 2012). Este resultado é reflexo da uniformidade do gabarito, elevada taxa de ocupação, proximidade entre os edifícios (cânion urbano) e conseqüente densificação massiva. Em contrapartida, a verticalização, quando configurada com variação de altura e ocupação reduzida, produzem melhores condições de acesso à luz solar e geram baixo impacto adverso, principalmente com a inserção de uma nova edificação na vizinhança (Scalco, 2010).

III - METODOLOGIA

3. METODOLOGIA

A tese foi dividida em quatro etapas de investigação. Na **Etapa 1**, foi realizada a **definição das áreas de estudo**, selecionando três recortes urbanos situados na cidade de João Pessoa/PB como locais representativos para análise. O primeiro recorte foi caracterizado pela condição de céu desobstruído, enquanto os demais foram selecionados com base na interferência do ambiente edificado e de arborizações.

Na **Etapa 2**, foram realizadas **medições da radiação ultravioleta eritemal para céu desobstruído** por meio do Índice Ultravioleta (IUV). Para a medição de campo, foi aferido o IUV horário e, a partir dele, calculado o IUV diário, mensal e sazonal para comparação com dados de radiação global. Esses últimos são comumente medidos em estações meteorológicas convencionais e automáticas em algumas cidades brasileiras. Os registros de radiação solar global foram extraídos de medições realizadas pelo INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), sendo o banco de dados utilizado nesta etapa da pesquisa.

Os demais recortes, localizados em bairros de zonas costeiras da cidade de João Pessoa/PB, foram selecionados para **medições da incidência de radiação ultravioleta para céu obstruído na Etapa 3**. Esses recortes estão situados em áreas urbanas definidas por diferentes tipos de sombreamento. Nesta etapa, foram descritas as estações de trabalho, realizadas medições de radiação ultravioleta em áreas obstruídas por árvores e/ou edifícios, e em áreas abertas com maior incidência direta do sol. Além disso, as estações foram caracterizadas quanto a magnitude das sombras urbanas por meio de indicadores de obstrução do céu.

Na **Etapa 4**, foi apresentada uma proposta de indicador para determinação da obstrução do céu, o **Fator de Céu segmentado (FCs)**. Adaptado de indicadores já consolidados na literatura, como *Sky View Factor* e *Sun Coverage Factor*, este tópico descreveu todos os passos para geração de imagens hemisféricas, simulação e classificação das frações de céu obstruído considerando os mesmos recortes da etapa anterior.

Por fim, na **Etapa 5**, foram descritos os **procedimentos estatísticos** utilizados para análise dos dados extraídos nas medições de campo. Nesta etapa, foram apresentados os

testes estatísticos aplicados para avaliação de pressupostos, testes de hipóteses, comparativos, bem como os modelos de regressão.

Todos os procedimentos metodológicos estão apresentados na Figura 13.

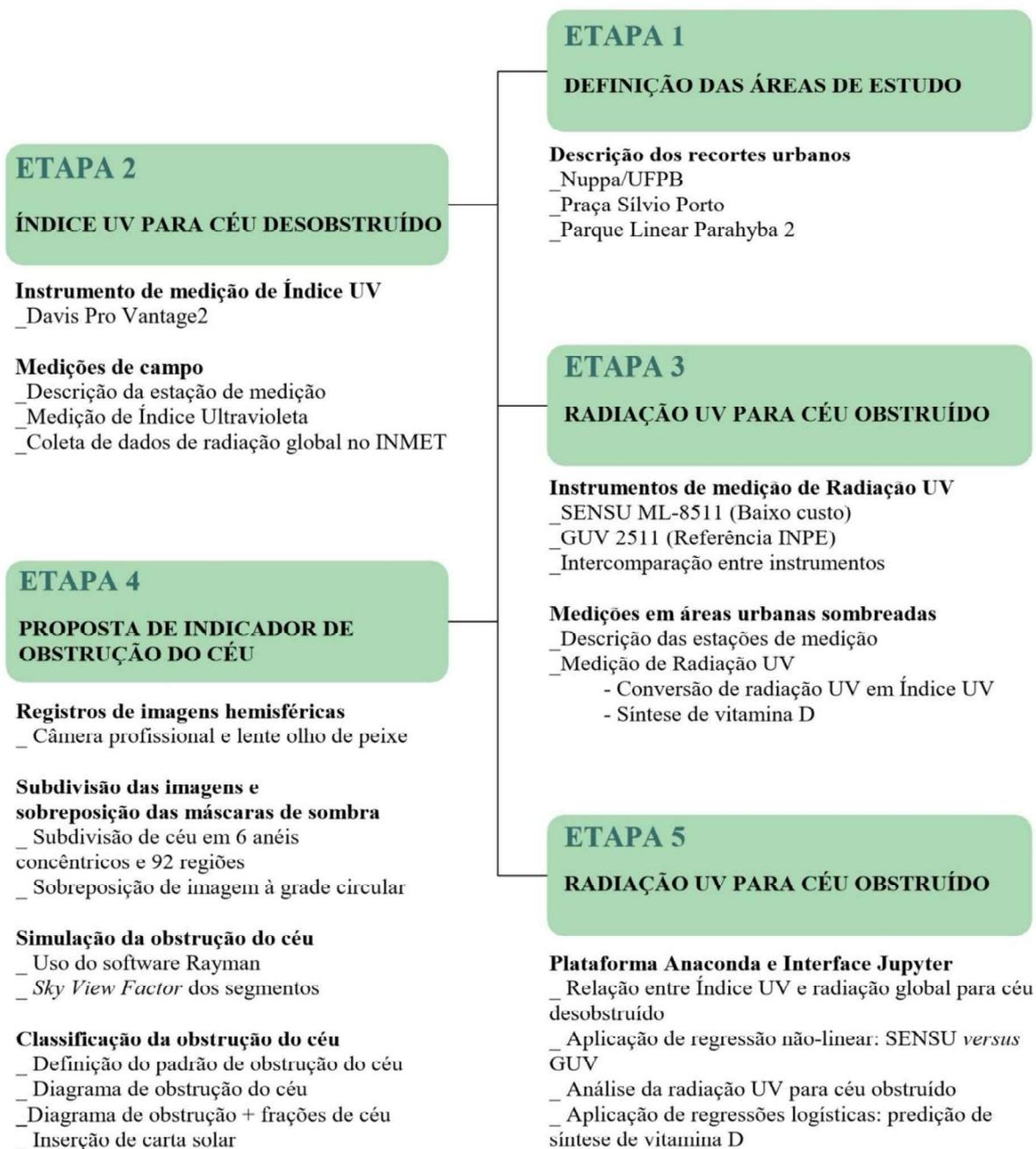


Figura 13 – Descrição das etapas da metodologia

3.1. Etapa 1 - Definição das áreas de estudo

A investigação foi realizada na cidade de João Pessoa/Paraíba, nordeste brasileiro, localizada a 7° Sul e 34° Oeste, com altitude de 43m (Figura 14). Parâmetros meteorológicos atingem médias de temperaturas de 27°C ($\pm 2,5^\circ\text{C}$), umidade relativa de 74% ($\pm 11,6\%$) e radiação global de 1.502,8 KJ/m² com pico no mês de janeiro (INMET, 2022). Três recortes urbanos foram escolhidos para realização do experimento. Os dois primeiros recortes estão localizados na porção sul, sendo um no Bairro de Manaíra e outro no bairro Jardim Oceania, delimitados pela Praça Silvio Porto e pelo Parque Parahyba II, respectivamente. O terceiro recorte está situado na porção sul, no Bairro Costa do Sol.

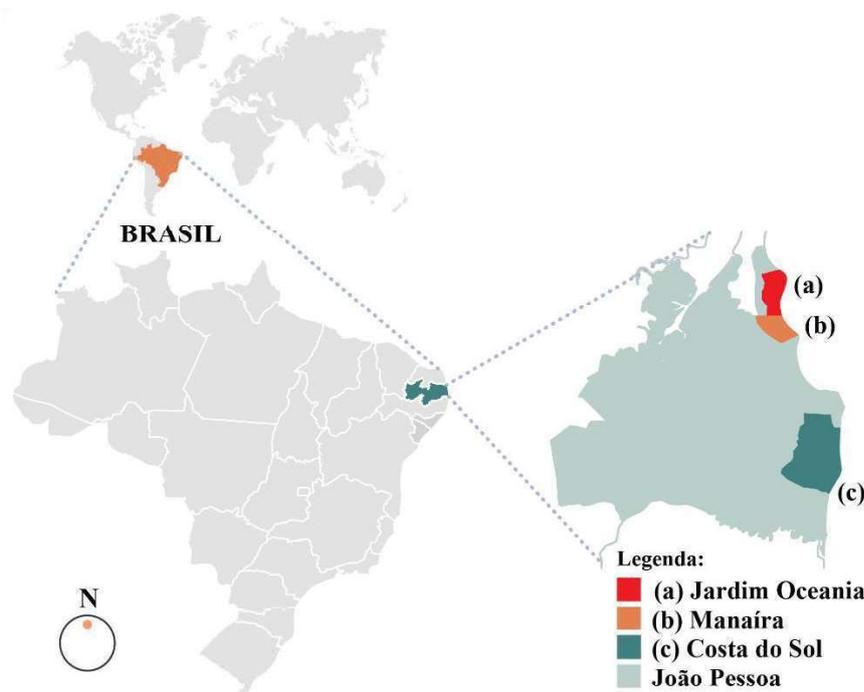


Figura 14– Mapa de localização: João Pessoa (PB) e os bairros de (a) Jardim Oceania, (b) Manaíra e (c) Costa do Sol.

O primeiro recorte da investigação foi o Parque Linear Parahyba II, localizado no bairro Jardim Oceania. Inserido em uma Zona de Preservação Ambiental (ZPA) e de Proteção Paisagística, sua origem se deu por meio de antigas áreas de drenagem de águas pluviais ao longo de um canal. Juntamente com os bairros do Bessa e Aeroclubes, o Jardim Oceania vem passando por forte processo de verticalização, com uso do solo englobando várias categorias, desde ocupações residenciais a comerciais e de serviços. Com

predominância de mata atlântica, sua cobertura vegetal é do tipo restinga com alterações consequentes do uso para ocupação urbana (Figura 15a).



Figura 15 – Delimitação dos bairros de (a) Manaíra, (b) Jardim Oceania e (c) Costa do Sol, e destaque para os recortes urbanos investigados. Fonte: Adaptado de Google (2023).

Manaíra é considerado um dos bairros de maior presença arbórea em termos de arborização urbana, contando com cerca de 6% do total de árvores da cidade. Em contrapartida, conta com mais de 300 edificações multifamiliares e diversos estabelecimentos de uso comercial, serviços e institucional (SEMAM, 2023). Com mais de 13.000 m², o segundo recorte, delimitado pela Praça Silvio Porto, apresenta uma quantidade significativa de vegetação concentrada no anel externo onde se localiza a área de passeio de pedestres e calçadas. As principais espécies arbóreas encontradas são Ficus, Oitís, Eucaliptos, Pau Brasil, Aroeiras, Castanholas, Algarobas, Ipês, Palmeiras, Oliveiras, Olho de Pombo, Jacarandá, entre outras. No entorno, encontra-se também uma alta concentração

de edificações verticalizadas, sobretudo na porção nordeste e sudoeste do bairro. O sombreamento urbano desse recorte é marcado pelo agrupamento de árvores e por sequências de edifícios multipavimentos, mais evidente no entorno da praça. O uso predominante da praça é lazer contemplativo, recreativo e esportivo, contando com áreas de playground e quadras (Figura 15b).

O Núcleo de Pesquisa e Processamento de Alimentos (NUPPA/UFPB) está localizado no Centro de Pesquisa complementar da Universidade Federal da Paraíba (UFPB) à 10 km do Campus I, situado no bairro Costa do Sol. Próximo ao Mangabeira, esse bairro tem formação recente com crescimento populacional em ritmo acelerado. Por fazer parte da zona de expansão da cidade de João Pessoa, ainda se encontra um grande percentual de áreas verdes e infraestruturas escassas (Figura 15c).

3.2. Etapa 2 - Índice Ultravioleta (IUV) em João Pessoa/PB para céu desobstruído

Na etapa 2, foram realizadas aferições de índice ultravioleta considerando condições de céu desobstruído. Este estudo foi realizado no Núcleo de Pesquisa e Processamento de Alimentos (NUPPA/UFPB) localizado na cidade de João Pessoa/PB. Foram verificados os IUV horário, diário, mensal e sazonal e comparados com dados de radiação global. Estes, por sua vez, são comumente aferidos em estações meteorológicas convencionais e automática em cidades brasileiras. Os registros de radiação solar global foram extraídos de medições realizadas pelo INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), sendo o banco de dados utilizados nesta etapa da pesquisa. A seguir, estão detalhados os dois passos para medição de índice ultravioleta: (1) Instrumento utilizado para o experimento de campo – Davis Vantage Pro2 e (2) Descrição da medição de campo – NUPPA/UFPB.

3.2.1. Instrumento de medição de campo – Davis Vantage Pro2

Nesta etapa, o equipamento utilizado foi a estação meteorológica Davis Vantage Pro2 (Figura 16a). Composto por diversos sensores, ele mede diferentes variáveis climáticas, incluindo temperatura, umidade, velocidade e direção do vento, pressão barométrica e precipitação. A estação meteorológica apresenta duas unidades principais: uma externa, localizada no topo de uma estrutura elevada para garantir a captura precisa dos dados, e um console interno que exibe e armazena as informações coletadas. A comunicação entre as unidades é realizada *wireless*,

garantindo uma instalação mais eficiente. Além disso, o instrumento é capaz de medir o índice ultravioleta, fornecendo informações importantes sobre a intensidade da radiação UV e permitindo a avaliação dos riscos à saúde associados à exposição solar.

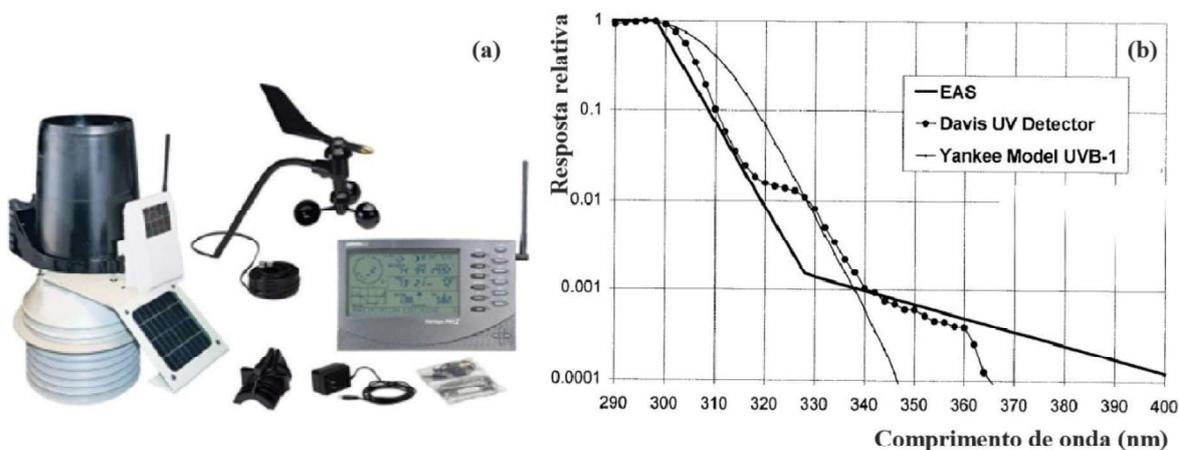


Figura 16 – Console de estação meteorológica(a) e resposta relativa da Davis Vantage Pro2 (b).

Quando acoplado, o sensor UV pode atingir índice inferiores a 16 com acurácia nominal ou margem de erro de 5% (Figura 16b). O sensor UV tem resposta espectral entre 280 e 360 nm muito próxima ao espectro de queimaduras solares (DAVIS, 2007). O índice ultravioleta representa a irradiância ponderada espectralmente para ação de eritema (queimaduras solares) com unidade equivale a 25mW/m^2 . Os dados coletados foram registrados em intervalos regulares (a cada 1h) e, posteriormente, transferidos para um computador para análise e interpretação. O software WeatherLink foi utilizado para gerenciar e visualizar os dados, facilitando a compreensão das condições meteorológicas durante o período de estudo.

3.2.2. Descrição da medição de campo – Índice Ultravioleta

Os dados de radiação ultravioleta com série temporal horária foram obtidos por meio de levantamento em estação instalada em 2012 no Núcleo de Pesquisa e Processamento de Alimentos - NUPPA/UFPB (Figura 17a). Situado no Centro de Pesquisa suplementar da Universidade Federal da Paraíba (UFPB) e sob condução de pesquisadores do Laboratório de Conforto (Labcon/UFPB), a escolha desse local se deu por se tratar de uma área aberta, livre de obstrução do céu. O recorte apresenta 10 edifícios, com predominância de um pavimento, e uma área extensa correspondente à elementos arbóreos.



Figura 17 – Localização do recorte (a) e área destinada a medição de campo – Nuppa/UFPPB (b).

A estação meteorológica Davis Pro Vantage2 foi instalada mais distante das concentrações de edifícios em área destacada na Figura 17b. As medições ocorreram de janeiro de 2012 a dezembro de 2013. Mesmo o datalogger armazenando registros durante dois anos, foram utilizados apenas os dados obtidos no ano de 2013, das 6h às 17h, por apresentar erros de medição e ocorrências nulas em menor proporção.

Assim, foi proposta uma comparação com dados de radiação global, que são mais facilmente encontradas em estações meteorológicas nacionais. Os dados de irradiâncias globais horárias para o mesmo período de estudo foram coletados na estação meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET e levantados em estações automáticas instaladas na cidade de João Pessoa/PB. Deste modo, foram seguidos os mesmos recortes temporais das medições de índice ultravioleta.

A etapa de tratamento dos dados consistiu na organização e tabulação das séries temporais. O resultado das medições passou por uma pré-análise, de modo a identificar as ocorrências incoerentes ocasionadas por erros e eliminar os registros nulos. Em seguida, os dados tratados foram tabulados e divididos por variáveis hora legal, dia e mês que a medição ocorreu, índice ultravioleta – IUV, medida adimensional, e radiação global em W/m^2 (INMET, 2013).

3.3. Etapa 3 - Radiação ultravioleta em João Pessoa/PB para céu obstruído

Para as **medições da incidência de radiação ultravioleta para céu obstruído**, foram definidos dois recortes urbanos, localizados em bairros da zona costeira da cidade de João Pessoa/PB. As estações de medição foram caracterizadas por áreas obstruídas por árvores e/ou edifícios e por áreas mais desobstruídas com maior incidência direta do sol. A incidência de radiação ultravioleta no meio urbano foi investigada em 2 subetapas: (1) Instrumento de medições de campo com Confortímetro SENSU e radiômetro GUV ML8511 (Equipamento referência – INPE) e (2) Medições de radiação ultravioleta.

3.3.1. Instrumento de medição de campo – Confortímetro SENSU e Radiômetro GUV ML8511 (Equipamento referência – INPE)

O Confortímetro da marca SENSU, desenvolvido pelo Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas dos Materiais – LMPT/UFSC, foi adaptado para detecção da radiação ultravioleta baseada em Arduino (Figura 18a). O sensor ML8511 é fabricado pela Lapis Semiconductor CO., Ltd (LAPIS, 2013; Serrano; Abril-Gago; García-Orellana, 2022), possui um fotodiodo sensível às faixas UVA e UVB e um circuito amplificador interno, fornecendo uma saída analógica de tensão linearmente relacionada à intensidade UV (Figura 18b).

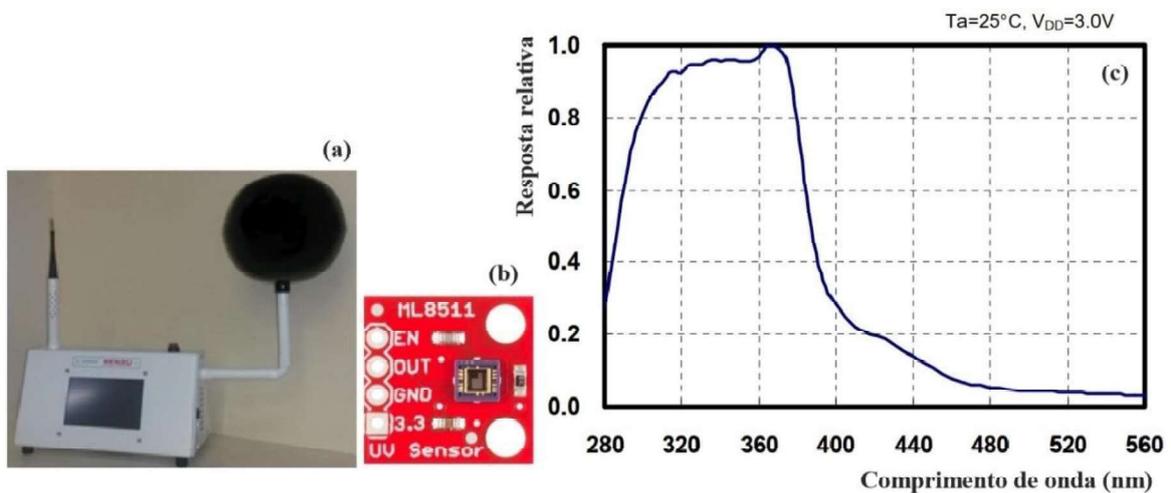


Figura 18 – (a) Confortímetro SENSU; (b) Placa do ML8511; (c) Curva de sensibilidade espectral do Sensor ML8511. Fonte: (LAPIS, 2013)

A função de resposta espectral do sensor apresenta contribuição significativa entre as faixas 280 e 400nm, com picos encontrados no intervalo de 308-376 e máxima em 365nm. A resposta espectral menor, abaixo de 0,1, atinge de 440 a 560nm, resultando em

sensibilidade a comprimentos de onda visíveis (Figura 18c). Esta adaptação permitiu que o instrumento, que originalmente se destinava a medições para outras variáveis climáticas, realizasse estimativas de radiação UV banda larga. O ML8511 é um sensor 100% aberto, sendo protegido apenas por uma camada de resina. Esta característica limita a utilização deste instrumento em condições de céu encoberto ou possibilidade de chuvas (LAPIS, 2013; LAPIS; ROHM, 2013).

Suas dimensões são de 4,0mm x 3,7mm x 0,73mm, e é adequado para medições em ambientes internos e externos, comumente utilizado para cálculo de Índice Ultravioleta (Zhang *et al.*, 2013) e efeitos da radiação UV em materiais (Wijatna *et al.*, 2019). O sensor ML8511 no SENSU registra os dados diretamente em um pendrive por meio de uma saída USB acoplada no instrumento com extensão de planilha *.xls. Os dados são obtidos em mW/cm². A ficha técnica do fabricante fornece uma conversão da tensão de saída à radiação UV e, em nota de aplicação, inclui o cálculo de conversão dos dados em UV gerados pelo sensor ML8511 para valores aproximados de índice ultravioleta (IUV) em concordância com o espectro de ação do CIE (*Commission Internationale de l'Eclairage*) (Figura 19).

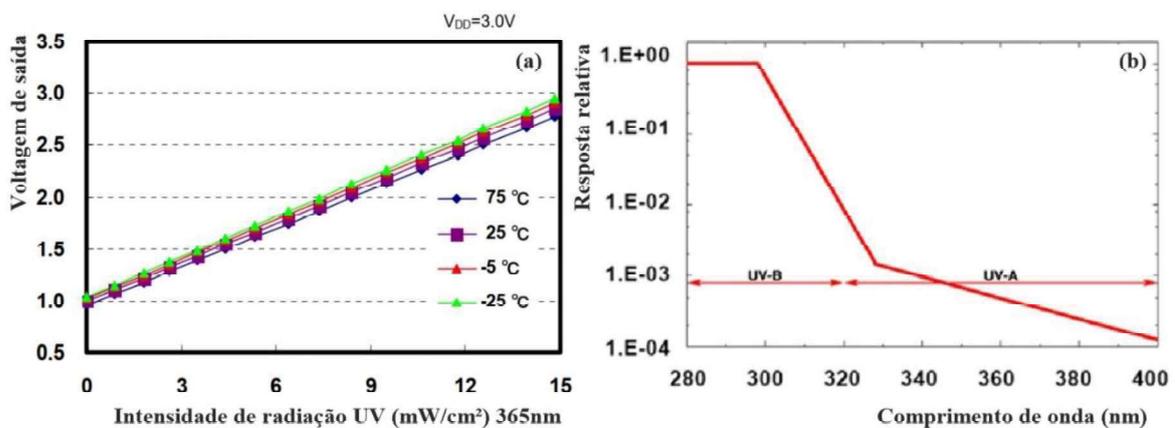


Figura 19 – (a) Intensidade UV versus Voltagem de saída; (b) Função espectral da CIE para queimaduras solares. Fonte: (LAPIS, 2013; LAPIS; ROHM, 2013)

Em procedimento de calibração desenvolvido para este sensor, as voltagens corrigidas convertem em IUV com erros de $\pm 1\%$ por meio da Equação 2:

$$UV = \int SS(\lambda) * Ery(\lambda) * 0,04 \text{ (Equação 2)}$$

Onde:

$SS(\lambda)$ = Espectro de Irradiância Solar; e

$Ery(\lambda)$ = Espectro de ação eritemal McKinlay-Diffey.

Na Equação 3, assumiu-se que a radiação UV total é a irradiação medida pelo sensor onde $k_1 = 0,00071$ e $k_2 = 0,05220$ são fatores médios eritemal para UVA (320-400nm) e UVB (280-320nm), respectivamente.

$$UVI = 0,04 * UVtotal (0,94 * k_1 + 0,059 * k_2) \quad (\text{Equação 3})$$

$$UVA = UV Total * 94,1\% \text{ e } UVB = UV Total * 5,9\%$$

Vale destacar que é um dispositivo de baixo custo, quando comparado aos monitorados em estações meteorológicas. No entanto, podem fornecer dados complementares e auxiliar no preenchimento de lacunas de pesquisa com a finalidade de avaliar a radiação UV. É importante notar que pode haver algumas diferenças na exatidão e precisão das medições obtidas a partir de dispositivos de baixo custo em comparação com instrumentos mais onerosos. Nesse contexto, é relevante mencionar que existem estudos que tratam do projeto e construção de instrumentos baseados em Arduino para medir a radiação UV utilizando o Sensor ML8511. Esses estudos destacam a viabilidade e eficácia desse sensor, contribuindo para o aprimoramento de dispositivos mais acessíveis (Ghaisyani, 2020; Hlaing, 2020; Miura *et al.*, 2007; Olatunde *et al.*, 2022; Zhang *et al.*, 2013).

O Radiômetro GUV-2511 (*Ground-based Ultraviolet Radiometer – Biophere Instruments Inc.*) é um dispositivo de medição projetado especificamente para irradiâncias UV proveniente do Sol. Com dimensões de 15cm de diâmetro e 30cm de altura, o instrumento multicanal mede radiações UV em seis diferentes faixas espectrais isoladas: 305, 313, 320, 340, 380, 395nm. Ele também mede a radiação fotossinteticamente ativa (PAR) de 400 a 700nm, como UVA (320-400 nm) e UVB (280-320 nm). Permite também o cálculo do Índice UV, que é uma métrica utilizada para avaliar o potencial de dano à pele humana devido à exposição à radiação UV (Papandrea *et al.*, 2021). Sua maior precisão e acurácia em medições de radiação UV o torna-o um instrumento de referência confiável para comparações com outros dispositivos.

O GUV-2511 opera em software de aquisição de dados (*Logger*) baseado em sistema operacional (*Windows-based Logger data acquisition*) com saída em formato de arquivo MS-ACCESS. Também possibilita a visualização em tempo real e a evolução temporal das irradiâncias pelos canais de 305, 313, 320, 340, 380 e 395nm (Papandrea *et al.*, 2021). Para obtenção das variáveis de medição UV, foram utilizadas equações e seus respectivos coeficientes calibrados em cada um dos canais, sendo as Equações 4, 5 e 6:

$$UV = a_1 * E_{305} + a_2 * E_{313} + a_3 * E_{320} + a_4 * e_{340} \text{ (Equação 4)}$$

$$UVA = a_1 * E_{340} + a_2 * E_{380} \text{ (Equação 5)}$$

$$UVB = a_1 * E_{305} + a_2 * E_{313} \text{ (Equação 6)}$$

O GUV foi o equipamento referência, cuja estação de medição foi instalada no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) durante o mês de julho de 2023 (Figura 20). As medições foram conduzidas ao longo de cinco dias consecutivos, entre as 8h e 15h, com uma frequência de coleta a cada 1 minuto. Embora fossem previstos dias de medição contínua, fatores como falhas nas medições, dados nulos ou mudanças climáticas inesperadas (chuvas), impactaram nos resultados, totalizando em dois dias de medição contínua e três dias com variações nas condições de coleta.

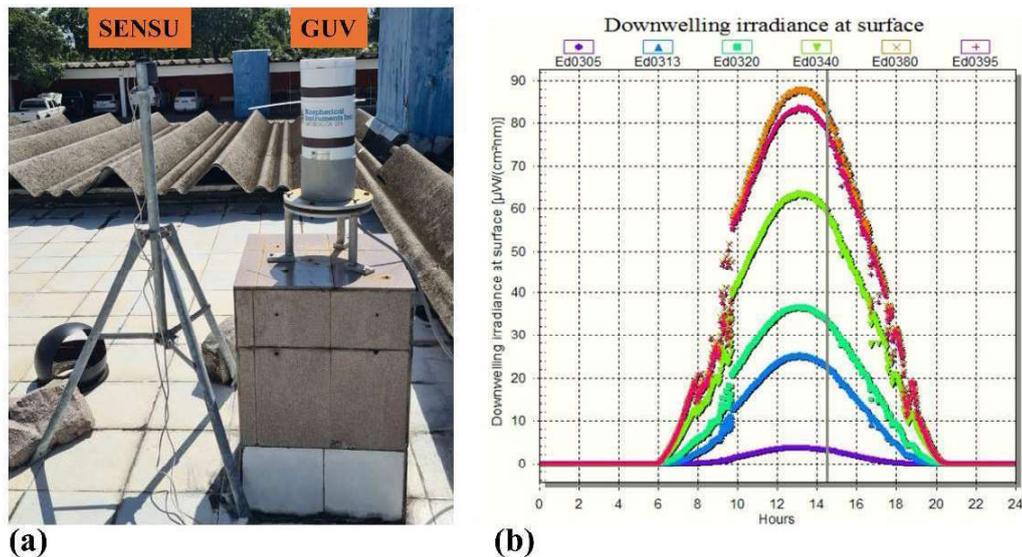


Figura 20 – (a) Equipamentos de medição instalados no INPE e (b) Visualizador do software Logger.
Fonte: Acervo da autora e Papandrea *et al.* (2021).

Os equipamentos SENSU e GUV foram posicionados próximos um do outro para permitir medições simultâneas, a uma mesma altura e livre de obstruções e sombreamento de elementos do entorno, com sensores voltados para cima em direção ao zênite (perpendicular ao nível do solo). As leituras foram registradas e armazenadas em um banco de dados para análise subsequente. A intercomparação entre os equipamentos permitiu avaliar as discrepâncias nas medições e entender as limitações e possibilidades de cada um deles, ressaltando a importância de investigar a viabilidade na obtenção de dados precisos a partir de dispositivos de baixo custo e mais acessíveis.

3.3.2. Descrição da medição de campo – Radiação ultravioleta

As estações de medição estão situadas em dois recortes urbanos: Praça Silvio Porto (Figura 21) e Parque Linear Parahyba II (Figura 22). A escolha do recorte da Praça Silvio Porto foi fundamentada por apresentar diversas espécies de árvores agrupadas, acompanhadas por um entorno adensado e verticalizado, caracterizado pela presença de edifícios multipavimentos. Ainda, foi motivada pela combinação de elementos, integrando a vegetação e a verticalização urbana. A Figura 21a ilustra a localização da praça Silvio Porto no bairro de Manaíra e destaca a área destinada às medições de campo (Figura 21b).

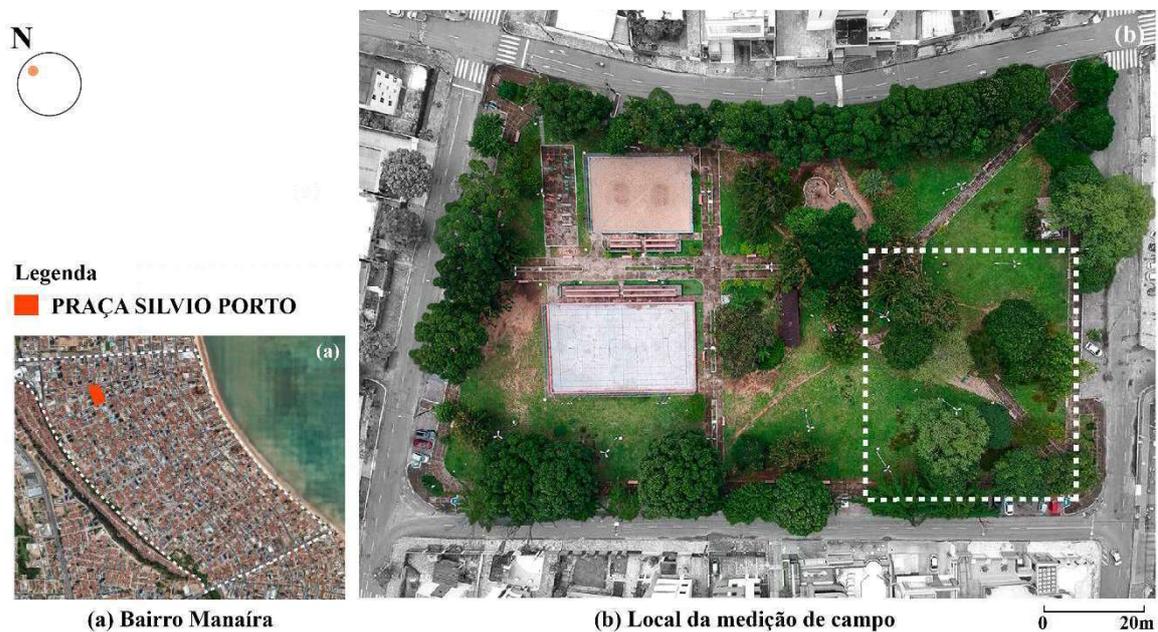
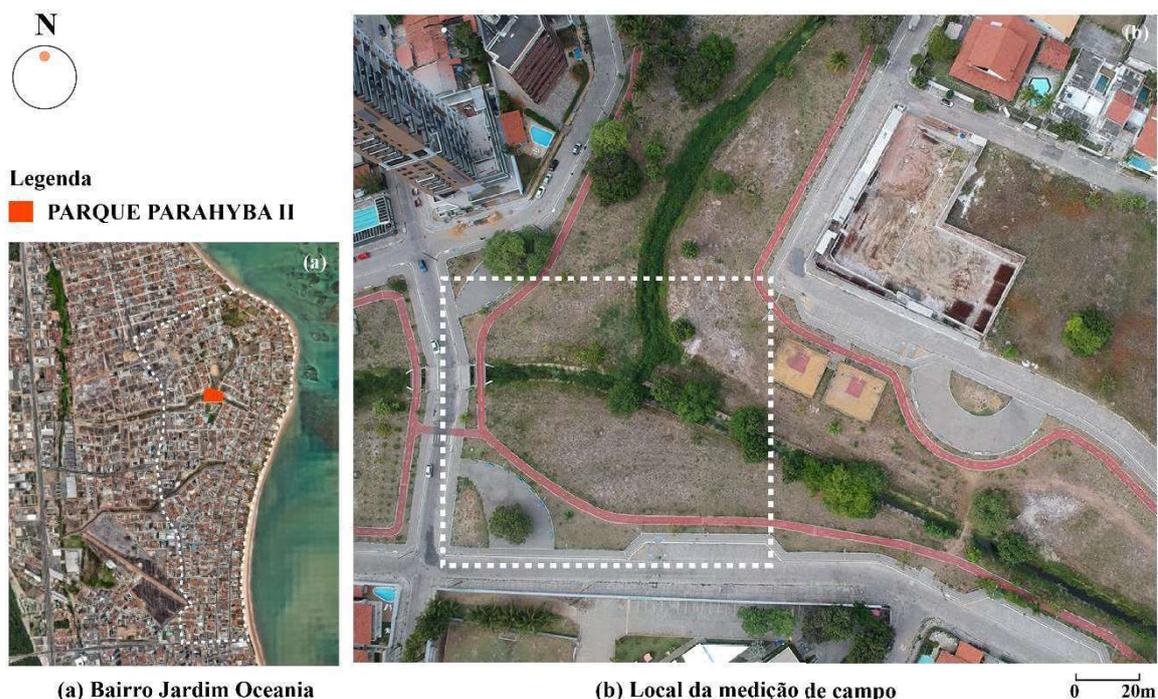


Figura 21 – Localização do recorte (a) e área destinada a medição de campo – Praça Silvio Porto (b)

Situado no bairro Jardim Oceania, o Parque Linear Parahyba II foi selecionado como o segundo local destinado às medições de radiação ultravioleta para céu obstruído. Sua escolha se deve à baixa presença de árvores de médio e grande porte, resultando em áreas isoladas de sombra com mínima interferência dos edifícios. Por se tratar de uma área em expansão, com algumas construções em andamento, os edifícios multipavimentos são mais espaçados, com menor densidade e com maior frequência de vazios urbanos. Isso proporciona um cenário mais amplo em comparação ao recorte anterior. Essa diferença entre os recortes permitiu explorar diferentes contextos urbanos arborizados. A Figura 22a destaca o recorte em relação ao bairro e na Figura 22b ilustra o local escolhido para a realização das medições de campo.



(a) Bairro Jardim Oceania

(b) Local da medição de campo

0 20m

Figura 22 – Localização do recorte para medição de campo – Parque Parahyba 2

As medições de radiação ultravioleta foram definidas por dois tipos de estações de investigação em áreas urbanas: (a) **Estação Sol (Referência)**, as que sofreram baixo impacto das obstruções e (b) **Estação Sombra**, as que são obstruídas por árvores e/ou edifícios. Os dados de exposição à radiação ultravioleta foram coletados com a utilização do equipamento Confortímetro SENSU adaptado para medições ultravioletas por meio dos sensores de UV – ML8511 (LAPIS, 2013; Serrano; Abril-Gago; García-Orellana, 2022) para captação de radiação de banda curta com resposta espectral nos comprimentos de onda entre 280 e 400nm em microwatt por centímetro quadrado – mW/cm^2 . Os dados medidos foram convertidos em função dos resultados dos modelos comparativos do equipamento SENSU e GUV, considerando a etapa de validação do instrumento apresentada no Tópico 3.3.1.

As medições de radiação ultravioleta foram realizadas nos meses de agosto, setembro, outubro, novembro de 2022 e janeiro de 2023. Foram programados registros a cada minuto em dois recortes temporais: 7h às 12h (para avaliação da radiação no início do dia até o meio-dia solar); 12h às 17h (início da tarde até final do dia), sendo medidos em dias distintos e não consecutivos. Os ângulos de elevação solar variaram de 11° a 64° para este período de amostragem. Em todas as estações, o sensor UV foi posicionado no tripé no plano horizontal conectado ao confortímetro e instalado em cada estação. Nas Estações Sombra, a

medição ocorreu sob a copa das árvores com distância de aproximadamente 1,00m da base do tronco (Gies *et al.*, 2007) e altura de 1,20m acima do solo. Na Estação Sol, o conjunto tripé + sensor foi instalado em área com o mínimo de interferência do entorno nos recortes (Figura 23).

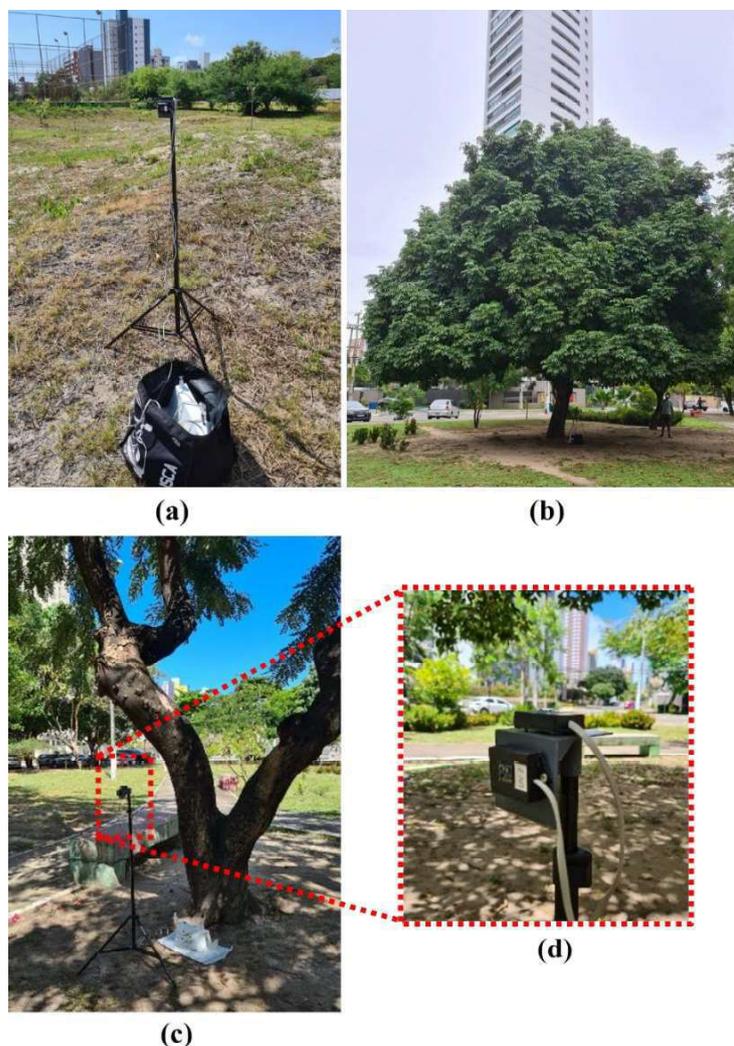


Figura 23 – Estação Sol (a) e Estação Sombra (b); Localização do equipamento de medição SENSU (c); e Detalhe da instalação do sensor (d).

Após conduzir as medições de radiação ultravioleta nas Estações Sol (com baixa interferência do entorno) e Sombra (áreas sombreadas e obstruídas por árvores e edifícios), os resultados obtidos possibilitaram a análise da magnitude da incidência UV em espaços urbanos com diferentes condições de obstrução do céu. Ainda, os dados de radiação ultravioleta convertidos em Índice Ultravioleta (IUV) foram utilizados na investigação sobre a previsão de síntese de vitamina D em ambientes urbanos com a perspectiva de averiguar a probabilidade de geração de espaços urbanos saudáveis.

Para avaliar a predição da síntese de vitamina D em ambientes urbanos, empregou-se o Índice Ultravioleta (IUV) como um indicador para estimar a produção do hormônio D. Classificando como zona segura para evitar queimaduras solares (Johnston; Mckenzie; Liley, 2006), assumiu-se que um IUV inferior a 3 impossibilita a produção de vitamina D sem a indução ao eritema. Considerando o critério de IUV iguais ou superiores a 3, se tem queimaduras solares em 60 minutos de exposição da pele e síntese de vitamina D em 4,3 minutos (Tabela 3).

Tabela 3 – Critérios de Índice UV e tempo de exposição adotados em correspondência à queimadura e síntese de vitamina D (Fonte: Mckenzie *et al.*, 2009)

IUV	Tempo para ocorrência de queimadura	Tempo para ocorrência de síntese de vitamina D (1000 UI)	
		100% de área de pele exposta	10% de área de pele exposta
3	60 minutos	4,3 minutos	43 minutos
9	20 minutos	1,1 minutos	11 minutos

Este alcance de índice ultravioleta e tempo de exposição se refere especialmente a indivíduos com fototipo de pele II, com 10% da área da pele exposta e sem o uso de proteção solar. O tempo de exposição pode ser de 4,3 e 43 minutos para 100% e 10% de pele exposta, respectivamente. A recomendação de 15 a 20 minutos de exposição (Holick, 2011; Hossein-Nezhad; Holick, 2013; Osmancevic *et al.*, 2015b) aplica-se somente quando o IUV está abaixo de 9 (MCKENZIE *et al.*, 2009). Acima desse índice, a exposição superior a 20 minutos já resulta em queimaduras solares.

3.4. Etapa 4 - Proposta de indicador de obstrução do céu

Na Etapa 4, foi proposto um novo indicador para determinação da obstrução do céu, denominado o **Fator de Céu segmentado** (FCs), que consiste na adaptação do *Directional SVF* (Musselman *et al.*, 2012) e do *Sun Coverage Factor* (Calcabrini *et al.*, 2019). Diferente dos tradicionais, o FCs estima a magnitude das obstruções urbanas em frações de céu com a maior probabilidade de interferência solar. Sua área de abrangência é determinada pelo caminho aparente percorrido pelo sol com a sobreposição da carta solar da localização desejada (latitude) nas imagens hemisféricas. Para determinação do FCs foram necessárias a realização de 4 subetapas: (1) Aquisição de imagens hemisféricas, (2) Subdivisão de céu e geração de máscara de sombras fracionada, (3) Simulação do SVF no Software Rayman e estimativa do FCs e (4)

Classificação da obstrução por fração de céu. A Figura 24 ilustra a sequência utilizada para a determinação do Fator de Céu segmentado (FCs).

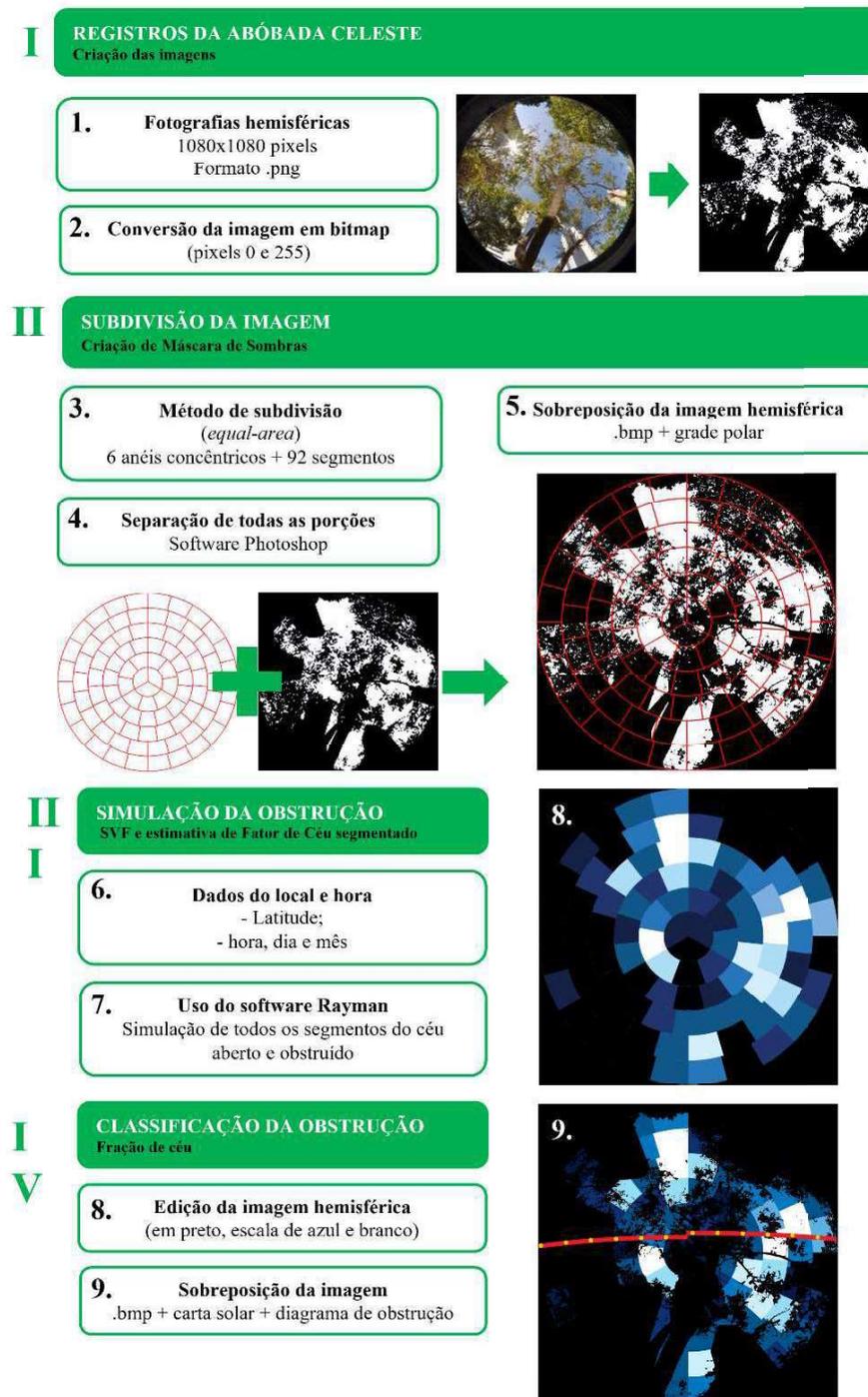


Figura 24–Esquema utilizado para determinação do Fator de Céu segmentado (FCs)

3.4.1. Registros de imagens hemisféricas

As imagens hemisféricas foram registradas em câmera profissional Nikon D90 e uma lente *fisheye* circular SIGMA 4,5mm F2,8 com projeção equisólida 180° (Figura 25a). Um nível de bolha ajustado à tampa da lente garantiu a orientação horizontal da câmera, enquanto uma bússola foi usada no topo da câmera para o ajuste do Norte magnético e posterior correção para Norte geográfico. O conjunto foi instalado em um tripé com altura de 1,10 m, com lente em direção ao zênite, com ajuste do azimute ao Norte na porção superior da imagem. A resolução adotada para fotografia foi de 1080x1080 pixels, em formato *Portable Network Graphic* (.png) (Figura 25b).

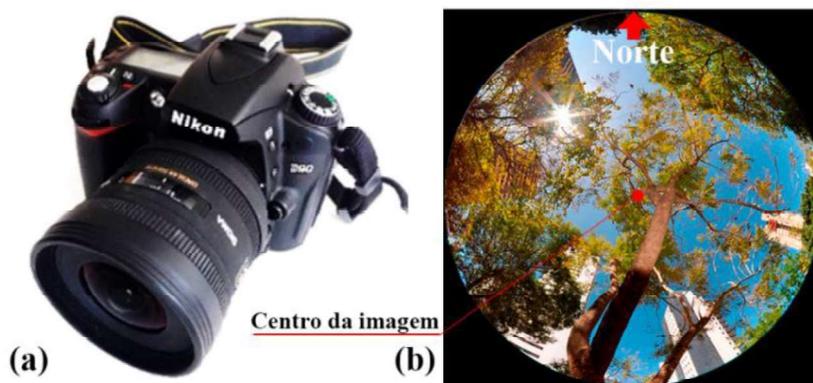


Figura 25 – (a) Câmera Nikon; (b) Imagem hemisférica.

3.4.2. Subdivisão das imagens e sobreposição da máscara de sombra

As técnicas aplicadas para geração de diferentes subdivisões não são investigações recentes (Tregenza, 1987; White *et al.*, 1998), tendo alguns exemplos representados na Figura 26. A mais utilizada é a que alcança áreas similares, *equal-area* ou *equisolid projection* (Figura 26a), onde todos os segmentos apresentam aproximadamente o mesmo ângulo sólido. Outras soluções empregam uma abordagem cujo parâmetro é a localização (latitude/longitude) (Figura 26b) ou ângulos de projeção iguais, *equal-angle* (Figura 26c) (Marsh, 2005). Para esta investigação, foi adotada o método de áreas iguais e ângulos sólidos aproximados (*equal-area method*). Assim, a subdivisão de céu foi feita por meio de uma grade polar com 6 anéis a partir de ângulos zenitais de 15° (15° – 90°) até o nadir (0°), totalizando 92 regiões de céu (Figura 26a). É evidente que, quanto menor a dimensão das regiões maior será a acurácia do resultado, mas também demanda maior tempo de resolução.

Como foi aplicado o procedimento manual (não automatizado) em etapa posterior, optou-se pela construção com menos segmentos.

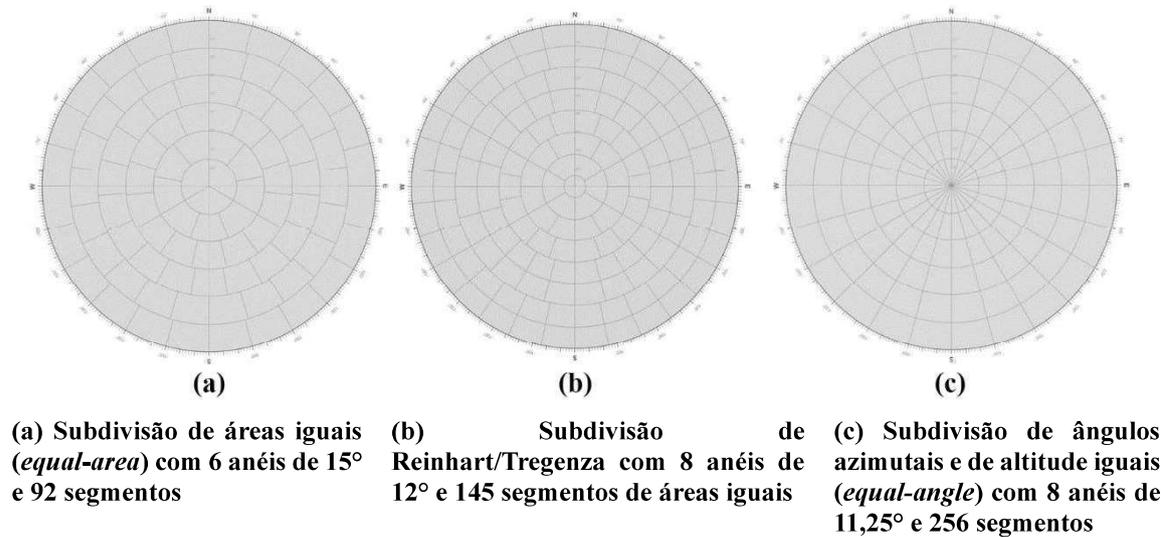


Figura 26 – Alguns exemplos de diferentes técnicas de subdivisão de céu. (Fonte: Adaptado de www.andrewmarsh.com)

Para imagens hemisféricas registradas no meio urbano, é possível separar a porção obstruída, como elementos construídos e vegetação, e a desobstruída, que representa a porção visível de céu. Assim, foi necessária a conversão da imagem original em uma versão em escala de cinza, alterando brilho e contraste para resultar em um registro preto e branco. A extração de céu foi realizada, separando os pixels referentes ao canal azul e averiguando se as áreas apresentavam correspondência com a porção celeste. Os pixels da vegetação aparecem na banda verde com variações em função do tronco, que podem se assemelhar às superfícies opacas dos edifícios ou qualquer outro elemento construído (Figura 27).

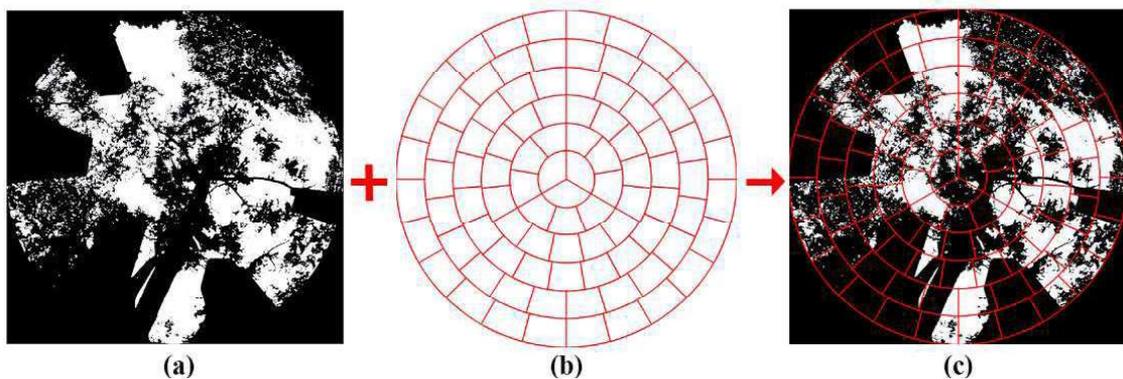


Figura 27 – (a) Máscara de sombras; (b) Subdivisão da imagem em segmentos; (c) Sobreposição da máscara de sombra e dos segmentos.

A imagem foi convertida para pixels de 0 e 255 no software de processamento de imagem *Photoshop*, onde a porção preta (pixel 0) representa obstrução e a branca (pixel 255) o céu visível, resultando na máscara de sombras (Figura 27a). Na sequência, procedeu com a geração de diagramas segmentados com a sobreposição da subdivisão de céu (Figura 27b) na imagem monocromática. Cada segmento indicou uma fração de céu que pode gerar parcelas de obstrução distintas (Figura 27c).

3.4.3. Simulação da obstrução do céu – Software Rayman

Para estimativa do SVF, foi utilizado o programa Rayman⁶ com base em imagens hemisféricas de formato quadrado, com espaço reservado para fotografia ao centro, tangenciando os quatro lados, e que o arquivo tenha extensão bitmap (.bmp). Outra particularidade é a verificação a orientação da imagem, sendo o topo a referência do Norte geográfico (Matzarakis, 2018). No programa, a estimativa do indicador SVF pode ser extraída com aplicação da lei dos cossenos, considerando o ângulo sólido da abóbada, ou com contagem de pixels, que determina o SVF geométrico (Figura 28).

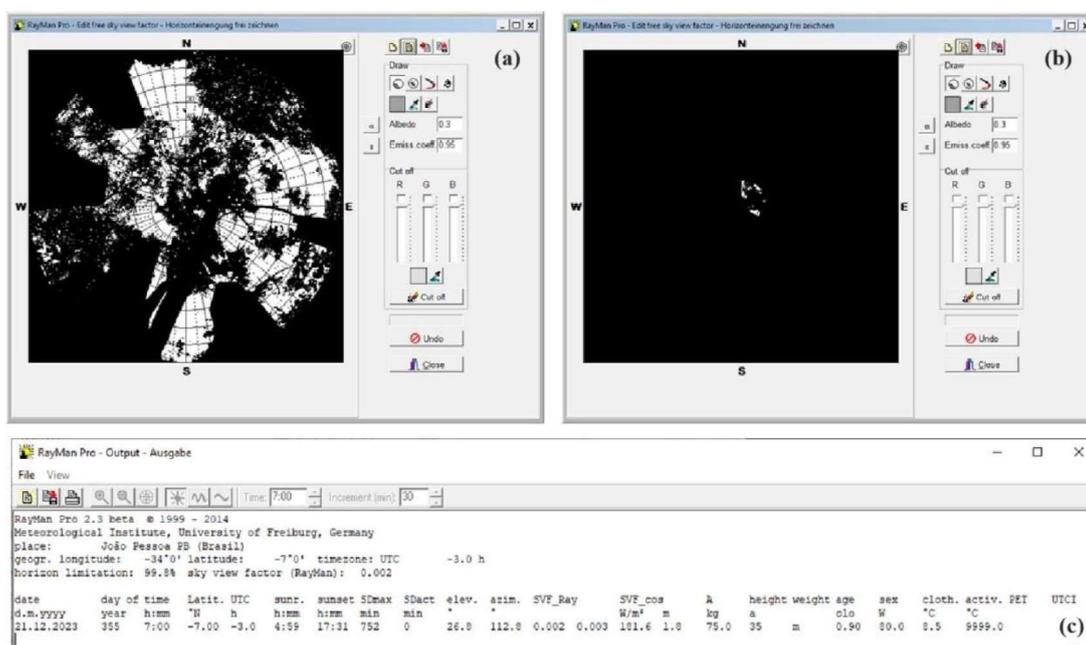


Figura 28 – (a) Máscara de sombras de toda a abóbada e (b) Imagem da fração de céu inseridas no Rayman. (Fonte: Matzarakis, 2018)

⁶ O Rayman é software de modelagem desenvolvido pela *Chair for Environmental Meteorology e Climatology of the Albert-Ludwigs-University Freiburg* para cálculo de índice de conforto térmico e que também é utilizado na determinação do Sky View Factor (SVF)

Para a simulação dos 92 segmentos de céu, foi adotado o indicador com base no ângulo sólido. Foram simulados os SVF de todas as subdivisões ($SVF_o < 1$) e calculadas em função do valor de SVF de cada segmento desobstruído ($SVF_d = 1$). Assim, a FCs de cada segmento segue o mesmo princípio adotado no SVF tradicional, com valores resultantes entre 0 e 1.

3.4.4. Classificação da obstrução – Fator de Céu segmentado (FCs)

A Figura 29 ilustra a sobreposição da máscara de sombra e as frações de céu. Para melhor visualização dos resultados, a imagem hemisférica monocromática (Figura 29a) foi editada para geração de um diagrama de obstrução (Figura 29b), representando graficamente o Fator de Céu segmentado (FCs) nas cores preta ($FCs \leq 0,10$), em tons de azul ($0,10 < FCs \leq 0,80$) e branca ($FCs > 0,80$), definidas como regiões obstruídas, parcialmente obstruídas e desobstruídas, respectivamente. A trajetória do movimento solar combinada à imagem hemisférica permitiu analisar o impacto dos elementos de obstrução sobre a duração do sol também simulada no software Rayman (Du; Ning; Yan, 2020).

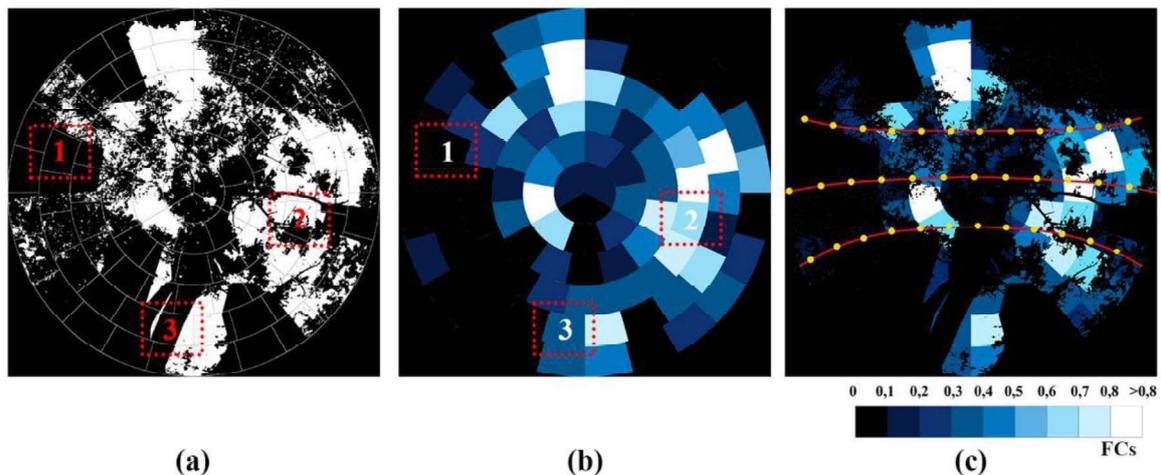


Figura 29 - (a) Sobreposição da máscara de sombras; (b) Diagrama de obstrução e (c) Diagrama de obstrução com a trajetória aparente do sol referente à localização geográfica de João Pessoa/PB.

A sobreposição da máscara de sombra no diagrama de obstrução do céu permite estimar a porção visível e obstruída em cada segmento por padrão temporal (horário, diário, sazonal ou anual), com a inserção da projeção do caminho do sol – latitude (Figura 29c). Esta carta ilustra a magnitude do bloqueio solar, definido pelas regiões mais escuras (preta), áreas semiabertas (em tons de azul) ou abertas (branca) em uma faixa de tempo em que a obstrução gerou sombreamento.

3.5. Etapa 5 - Procedimentos estatísticos para análise dos dados

Para a análise dos resultados e desenvolvimento dos modelos, foram aplicados métodos estatísticos. Após o pré-processamento dos dados, algoritmos disponíveis na linguagem Python versão 3.11 foram implementados com auxílio da plataforma Anaconda. Desenvolvida pela Anaconda Inc., é considerada uma distribuição de software gratuito, que fornece um conjunto de ferramentas para programação científica e de dados que são largamente utilizadas na análise e ciência de dados (Figura 30a). O Conda, sistema gerenciador de pacotes e ambientes de desenvolvimento integrado (IDE) ao Anaconda, foi utilizado para instalação e criação de ambientes virtuais, por meio da interface JupyterLab, que representa um IDE também fornecido pela plataforma (Figura 30b).

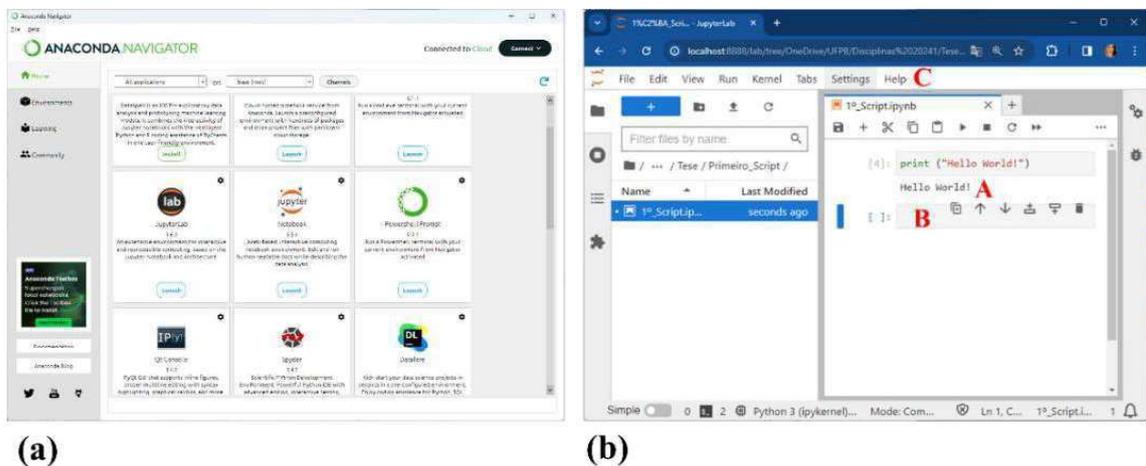


Figura 30 – (a) Plataforma Anaconda Navigator e (b) Interface JupyterLab – Console (A), Editor (B) e Ajuda (C)

Dentro do Conda, foram instaladas bibliotecas específicas que incluem a de aprendizado de máquina (SciKit-Learn), de funções matemáticas (NumPy), pacotes de funções científicas (SciPy), de análise de dados (Pandas) e de criação e visualização de dados (Matplotlib e Seaborn) (Rolon-Mérette *et al.*, 2020). Nesse contexto, desenvolveu-se scripts em Python para a implementação dos procedimentos estatísticos necessários. Todas as etapas iniciaram com análise exploratória dos dados com a estatística descritiva e posterior aplicação de testes e modelos de regressão.

As subetapas de testes e análise dos dados seguiu a sequência das 4 primeiras etapas da metodologia, denominadas: Relação entre radiação global e índice ultravioleta; comparativo entre instrumento de medição de radiação UV referência (GUV) e de baixo custo (SENSU); magnitude da radiação UV nas medições de campo; e predição da síntese de vitamina D em áreas abertas e obstruídas.

3.5.1. Relação entre Radiação Global e Índice Ultravioleta (IUV)

A relação entre a radiação global e índice ultravioleta foi avaliada seguindo parâmetros temporais como padrão horário, diário, mensal e sazonal (estações do ano). Foi definida como variável independente a Radiação Global e a variável dependente pelo Índice UV. A fim de caracterizar a distribuição dos dados de RG e IUV, iniciou-se com uma análise exploratória dos dados com as estatísticas descritivas, representadas por gráficos (histograma e boxplot) de modo a facilitar a avaliação do comportamento dos dados. O grau de associação entre as variáveis RG e IUV foi investigada por meio do teste de correlação de Pearson, resultando no coeficiente " ρ " (ρ). Este teste determina o grau de dependência, avalia a força e a direção e visa estimar uma possível relação que venha a existir entre as duas variáveis. Este coeficiente varia entre -1 e 1 , sendo a primeira uma correlação negativa perfeita e a segunda uma correlação perfeita positiva entre as duas variáveis. Quando o valor resultando é nulo, $\rho = 0$, significa que as duas variáveis não apresentam dependência linear uma da outra. Assim, calculou-se a correlação entre as variáveis de acordo com faixas temporais: horária, diária, mensal e sazonal. A Tabela 4 apresenta a escala do módulo de " ρ " e as respectivas interpretações:

Tabela 4 – Escala do coeficiente de correlação de Pearson

Valores de " ρ "	Concordância
0,0 a 0,3	Baixa
0,3 a 0,5	Moderada
0,5 a 0,8	Alta
0,8 a 1,0	Muito Alta

Empregando a análise de regressão linear, foi proposta uma função empírica estimada relacionando a radiação global com a radiação ultravioleta para as medições. Os modelos de regressão são modelos matemáticos que relacionam o comportamento da variável Índice UV e Radiação Global. Nesta análise, seguindo outros estudos (Canada *et al.*, 2003; Jacovides *et al.*, 2006; Ogunjobi e Kim, 2004), aplicou-se a relação linear com a função expressa pela Equação 7:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon \quad (\text{Equação 7})$$

Onde:

y = variável resposta (dependente) – Índice Ultravioleta (IUV)

x = variável explicativa (independente) – Radiação Global (RG)

β_0 e β_1 = coeficientes da regressão

ε = erro residual

A reta da regressão linear foi determinada com intuito de descrever a variação da variável respostas e dependente (IUV) em relação à variável explicativa independente (RG), aplicando o método dos mínimos quadrados. Para validação do desempenho dos modelos, foram utilizadas métricas de erro para obter previsões mais precisas e próximas dos valores reais. Além da previsão e possíveis aplicações futuras, os modelos foram avaliados para também explicar as relações e identificar se há impacto significativo entre as variáveis.

Já o coeficiente de determinação (R^2) indica a fração de flutuação de uma variável estimada a partir de outra e determina a confiança na estimativa. O intervalo é entre 0 e 1, indicando a capacidade de correlação linear. Comumente, coeficientes superiores a 0,80 é interpretado como modelos com relação de forte tendência, enquanto os inferiores a 0,50 são vistos como inadequados ou fracos, uma vez que menos de 50% da variabilidade dos dados de resposta é explicada pelo modelo.

Optou-se por avaliar o desempenho de modelos de regressão com as métricas RMSE (Erro Quadrático Médio da Raiz), o MAE (Erro Médio Absoluto) e o MSE (Erro Quadrático Médio). O RMSE avalia a magnitude dos erros ao calcular a raiz quadrada do erro quadrático médio entre os valores previstos e os valores reais em unidades da variável de resposta (IUV). Já o MAE mede erros médios absolutos entre os valores previstos e os valores reais.

3.5.2. Comparativo entre instrumentos de medição – SENSU *versus* GUV (Equipamento referência – INPE)

Para o comparativo dos instrumentos de medição empregados na pesquisa, foram conduzidas análises descritivas dos dados coletados com o objetivo de examinar a distribuição e variabilidade dos resultados extraídas de radiação UV. Foram utilizadas medidas como médias, desvios padrão e medianas para cada variável de interesse, incluindo as faixas de comprimento de onda registradas pelo equipamento referência, o Radiômetro GUV (INPE) e as estimativas de radiação UV obtidas pelo Confortímetro SENSU adaptado (LAPIS, 2013; LAPIS; ROHM, 2013). Adicionalmente, foram gerados gráficos boxplot para

representar visualmente a distribuição e possíveis dispersões dos dados registrados. Esses boxplots permitiram a identificação de possíveis valores discrepantes, fornecendo uma compreensão das diferenças nas medições entre os diversos equipamentos utilizados.

Testes estatísticos foram realizados visando estabelecer a relação entre o equipamento de medição de radiação ultravioleta de baixo custo, o SENSU-ML8511, e o GUV-2511, sendo o último caracterizado por sua maior precisão, custo elevado de manutenção e calibração. Teste de normalidade dos dados e de homogeneidade das variâncias foram executados, aplicando inicialmente teste Shapiro-Wilk a cada variável de interesse e em seguida, procedeu-se ao teste de Levene para avaliar a semelhança das variâncias nos grupos de medições. Com base nos resultados obtidos, dado que os pressupostos de normalidade e homogeneidade não foram atendidos, optou-se pelo uso de testes de hipóteses não paramétricos, sendo o teste de Mann-Whitney empregado para comparar as medianas entre grupos.

A escolha de modelos de regressão polinomial para relacionar os dados de saída dos dois instrumentos foi fundamentada pela necessidade de capturar possíveis relações não lineares entre as variáveis analisadas. Os modelos de regressão polinomial permitem a incorporação de termos de ordem superior, como quadráticos ou cúbicos, proporcionando flexibilidade para ajustar-se a padrões de dados mais complexos (Devore; Cordeiro, 2014). Isso é particularmente relevante quando se trata de medições de radiação ultravioleta, onde as relações entre as variáveis podem ter impactos de fatores não lineares. Essa abordagem contribuiu para uma validação mais robusta do instrumento de medição de baixo custo em comparação com o referencial de alta precisão (Ghaisyani, 2020; Hlaing, 2020; Serrano; Abril-Gago; García-Orellana, 2022).

As variáveis consideradas para análise no SENSU-ML8511 (LAPIS, 2013; LAPIS; ROHM, 2013) compreenderam a Radiação UV em mW/cm^2 , abrangendo faixas de comprimentos de onda entre 280 e 400nm, bem como o Índice UV estimado através da aplicação da Equação 3. No GUV-2511, foram examinadas as variáveis de Radiação UVA (320 a 400nm), Radiação UVB (290 a 320nm) e o Índice Ultravioleta. Essa abordagem permitiu uma avaliação mais abrangente da relação entre os dois instrumentos, considerando diferentes componentes da radiação UV e fornecendo um estudo mais representativo das capacidades e limitações do instrumento de medição de baixo custo com comparação com o de alta precisão.

Os modelos polinomiais são pertencentes a classe dos modelos de regressão linear múltipla, cuja utilização é comum em situações em que a função que relaciona a variável dependente (Y) às variáveis independentes (X_1, X_2, \dots, X_n) é curvilínea e representada por uma equação polinomial de grau “k” (Ostertagová, 2012), conforme a Equação 8:

$$y = \beta_0 + \beta_k X^k + e \text{ (Equação 8)}$$

Onde:

y = Variável resposta ou dependente – Medições da GUV-2511 (IUV, UVA e UVB)

X = (1, X_j, X_j^2, \dots, X_j^k), $i = 1, 2, \dots, n$ = variáveis regressoras, explicativas ou independentes – Medições do SENSU – ML8511

$\beta = (\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k)$ = Estimadores ou coeficientes dos parâmetros

k = Grau do polinômio

Este modelo é chamado de modelo polinomial de ordem k com uma variável explicativa. Quando o modelo tem grau 2 e 3 são conhecidos como quadrático ou cúbico. A técnica dos mínimos quadrados pode ser prontamente estendida para se ajustar dados por um polinômio de grau maior, que visam minimizar a soma dos quadrados dos erros (Devore; Cordeiro, 2014).

Para o desenvolvimento do modelo polinomial, procedeu-se com uma estratégia de divisão dos dados em conjuntos de treinamento e teste, destinando 80% dos dados para o treinamento e os 20% restantes para a fase de teste. Essa divisão foi fundamental para assegurar uma avaliação da capacidade do modelo generalizar para dados não observados durante o treinamento. Estes dados, que representam a maioria da amostra, foram submetidos a uma transformação polinomial. Esse processo visa capturar relações não lineares entre as variáveis, oferecendo uma representação mais flexível e adaptável ao comportamento complexo dos dados. Posteriormente, o modelo polinomial foi treinado utilizando o conjunto de dados resultante da transformação polinomial. Essa fase foi essencial para que o modelo se adaptasse à padrões complexos presentes nos dados de treinamento.

A última etapa consistiu na avaliação do desempenho do modelo utilizando os 20% dos dados de teste, bem como sua validação. As métricas de avaliação, como RMSE (Erro Quadrático Médio da Raiz), o MAE (Erro Médio Absoluto) e o MSE (Erro Quadrático Médio), foram empregadas para medir a precisão do modelo na previsão de novos dados.

A análise dos resíduos é um critério determinante para validação de um modelo. Os resíduos são conceituados como a diferença entre as observações e os valores ajustados. Eles devem ser independentes entre si, com variância constante e possuir distribuição normal (Cardoso *et al.*, 2023; Hyndman; Athanasopoulos, 2021). Para tanto, foram testados três pressupostos com aplicação dos testes de Durbin-Watson (autocorrelação), Goldfeld-Quandt (homoscedasticidade) e Shapiro-Wilk (normalidade).

3.5.3. Magnitude da radiação UV nas estações de medição

Na avaliação da magnitude da radiação UV nas estações de medição e os fatores de céu, a análise dos dados iniciou com a etapa de pré-processamento para remoção de valores ausentes ou inconsistentes e, assim, não comprometer a precisão dos resultados. Os dados foram estruturados com a criação de tabelas e gráficos de modo a facilitar as análises subsequentes. As variáveis independentes foram as **Estações de medição**, categorizadas de acordo o padrão de sombreamento, sendo **Estação Sol**, definida pela área com mínima interferência do entorno do entorno e a **Estação Sombra**, definida pela árvore predominante (Munguba, Olho de Pombo, Jacarandá, Ipê Rosa, Leucena e Jamelão) e o Período de medição, definido por minuto, por faixa de horas e por turno (manhã e tarde).

As variáveis dependentes foram representadas pelos valores de Radiação UV em mW/cm^2 , medidos sob a estação de referência sem obstrução e sob a copa das árvores, e os Fatores de Céu segmentados (FCs). Os impactos dos padrões de sombreamento urbano no acesso ao sol e céu foram avaliados segundo o FCs e verificados se o indicador explica a variabilidade da radiação ultravioleta incidente em cada estação. A normalidade dos dados foi testada com o teste de Shapiro, a fim de verificar a distribuição dos dados de radiação UV e dos fatores de céu. Já para avaliar a homogeneidade das variâncias foi aplicado o teste de Levene. O nível de significância foi estabelecido como $\alpha > 0,05$ para ambos os testes.

Para uma melhor visualização da distribuição e variabilidade dos dados, gráficos de histogramas e boxplots foram gerados, permitindo a identificação de possíveis valores discrepantes. Os dados com distribuição não normal foram representados pelas medianas e aplicados teste não-paramétrico de comparação múltipla de Kruskal-Wallis (hipótese nula = igualdade estatística entre as distribuições ou medianas). Este teste dispensa pressupostos de normalidade e homoscedasticidade e foi utilizado para determinar os efeitos da incidência

de radiação UV nas áreas sombreadas, bem como as diferenças apresentadas nos turnos manhã e tarde. Na sequência, utilizou-se o teste post-hoc de Dunn com a correção de Bonferroni para testar se as diferenças entre comparações múltiplas são significativas.

A eficácia da sombra proporcionada pelas árvores e edifícios foi determinada por meio do fator de redução da radiação UV, estabelecendo uma relação entre áreas obstruídas e desobstruídas. O Fator de atenuação é representado pela razão entre a radiação UV medida em áreas sombreadas pelo entorno (radiação UV das Estações Sombra) e a medida em áreas ensolaradas (Estação Sol). Este fator, que varia de 0 a 1, avalia o impacto da área sombreada na redução da radiação UV, onde valores próximos a 0 indicam uma maior atenuação na exposição, sugerindo uma proteção eficaz aos raios nocivos. Por outro lado, os valores próximos de 1 sugerem uma diminuição mínima indicando uma exposição mais frequente à radiação UV.

3.5.4. Predição de síntese de vitamina D

Para **avaliação da possibilidade de síntese de vitamina D**, foram elaborados modelos de regressão logística, definida pelo método estatístico que estima a relação entre uma variável dependente categórica (binária ou multinomial) e um conjunto de variáveis independentes. É amplamente utilizado em análise de dados para prever a probabilidade de um evento ocorrer com base em variáveis independentes. A regressão logística utiliza uma função Logit para modelar a relação entre as variáveis independentes e a probabilidade de pertencer a uma classe que as transforma em uma escala contínua. O procedimento de análise estatística dos dados foi a determinação e interpretação do modelo de regressão logística, utilizando a Equação 9:

$$\text{Logit}(\pi) = \beta_0 + \beta_1 \cdot X_i \text{ (Equação 9)}$$

Onde:

Logit (π): Função logística linearizada;

β_0 : Constante;

β_1 : Coeficiente angular;

X_i : Variáveis preditoras;

Os coeficientes $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_p$ são estimados a partir do conjunto de dados por meio do método da máxima verossimilhança, em que encontra a combinação de coeficientes que maximiza a probabilidade de a amostra ter sido observada. A curva logística tem comportamento probabilístico no formato da letra S, o que é uma característica deste tipo de regressão (Devore; Cordeiro, 2014; Hosmer; Lemeshow; Sturdivant, 2013). No cálculo da probabilidade de ocorrência da variável dependente binária, dada uma condição da variável preditora, Ayres *et al.* (2005) indicam a seguinte função (Equação 10):

$$P(Y = 1) = \frac{1}{1+e^{-g(X)}} \text{ (Equação 10)}$$

Onde:

P: probabilidade de ocorrência;

e: base dos logaritmos neperianos;

X: variável independente; e

$$g(X) = g(X) = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_p X_p$$

Foram analisadas duas classificações de modelos de regressão logística: predição de síntese D em áreas abertas (Modelo 1) e em áreas sombreadas (Modelo 2). Para o primeiro os estimadores foram padrão horário e condição de céu predominante, ambas variáveis binárias ou *dummy*. Já o segundo, foram realizados quatro tipos de modelagens, cujas variáveis foram definidas em três categorias de obstrução do céu, medido pelo Fator de Céu Segmentado (FCs), três categorias relativas à estratégia de sombreamento e ainda as variáveis binárias de condição de céu. Já o padrão horário diferiu em função das faixas temporais, classificadas em A com duas categorias (0: início e fim do dia; 1: próximo ao meio-dia solar), B com três categorias (a cada 3h de medição, sendo: até 10h = 0; das 10h às 15h = 1; e após às 15h = 2), C e D para medições a cada 2h com 5 categorias e 1h com 10 categorias respectivamente.

Os coeficientes da regressão logística representam o efeito das variáveis independentes nas probabilidades de pertencer a uma classe específica. Para obter-se uma boa estimativa da eficiência classificatória do modelo, recomenda-se separar a amostra em treinamento e teste de eficiência. Esses coeficientes são estimados durante o processo de treinamento do modelo. Para a verificação da significância dos atributos analisados para a predição de síntese de vitamina D,

adotou-se o valor nominal de 5%, ou seja, as variáveis preditoras contribuem significativamente quando o nível de significância for inferior a 0,05. Ressalta-se que a probabilidade aumenta ou diminui quando o coeficiente é positivo ou negativo, respectivamente.

A interpretação dos coeficientes na regressão logística é frequentemente feita em termos de razão das chances, que determina o efeito que os coeficientes exercem sobre a chance de um evento ocorrer. As estimativas dos parâmetros da Equação 9 são feitas com base nos dados amostrais e para o cálculo da Razão das Chances (*Odds Ratio* - OR), utilizou-se a Equação 11.

$$OR = e^{\beta_1} \text{ (Equação 11)}$$

Para avaliar a qualidade de ajuste de um modelo de regressão logística é verificado o pseudo R-squared (R^2) é definido como medida frequentemente usada para avaliar a qualidade de ajuste de um. Essas estatísticas pseudo R^2 variam de 0 a 1, onde um valor mais próximo de 1 indica um melhor ajuste do modelo. Um dos testes mais comuns é o Cox-Snell R^2 (CS R^2) que é comparável com o R-Square (R^2) da regressão linear, uma vez que indica qual percentual das variações ocorridas no Log da razão da chance pode ser explicado pelo conjunto de variáveis independentes. No entanto, não há uma interpretação direta similar ao R^2 na regressão linear, e o valor exato de R^2 a ser usado pode depender do contexto e dos critérios de avaliação do modelo.

Como indicador de desempenho do modelo, foi utilizado como método a Curva ROC (*Relative Operating Characteristic*) e a área sob a curva AUC (*Area Under Curve*). A Curva ROC é representada em um gráfico com uma curva de probabilidade criada traçando a taxa verdadeiro-positivo (Sensibilidade) contra a taxa de falsos-positivos (Especificidade). Ela informa sobre a habilidade do teste em refletir a real situação ou a sua capacidade preditiva de forma precisa e válida numa escala padronizada e fácil de interpretar. O indicador estatístico mais popular para descrever a curva ROC é a estimativa da “área sob a curva” (AUC) adequada e suavizada, que varia de 0,5 (nenhuma acurácia aparente) a 1,0 (acurácia perfeita), à medida que a curva pode se estender em direção ao canto superior esquerdo da área do gráfico.

IV - RESULTADOS E DISCUSSÕES

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Avaliação do Índice Ultravioleta e sua relação com a Radiação Global em João Pessoa/PB

Para caracterização dos dados, foram utilizados registros de Índice UV (IUV) medidos pelo instrumento Davis Pro2 e de Radiação Global (W/m^2) coletados a partir de estações automáticas monitoradas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). De ambas as bases foram extraídos apenas os intervalos horários entre 6h e 17h, abrangendo um período de um ano, de 1 de janeiro a 31 de dezembro de 2013. Após triagem, eliminação de dados faltantes e ajuste necessários, obteve-se uma amostra final resultando em 4.379 registros, composta por quatro variáveis temporais – hora legal, dia, mês e estação do ano – além do IUV e da radiação global.

A Figura 31 ilustra as distribuições dos dados em histograma e diagrama de caixa (boxplot), destacando as medidas de tendência central, bem como sua variabilidade. Ambas apresentaram distribuições não normais evidenciadas pela assimetria das curvas. Sem a presença de dados discrepantes, foram identificadas frequências uniformes para radiação global e tendência à maiores ocorrências em valores mais baixos de IUV.

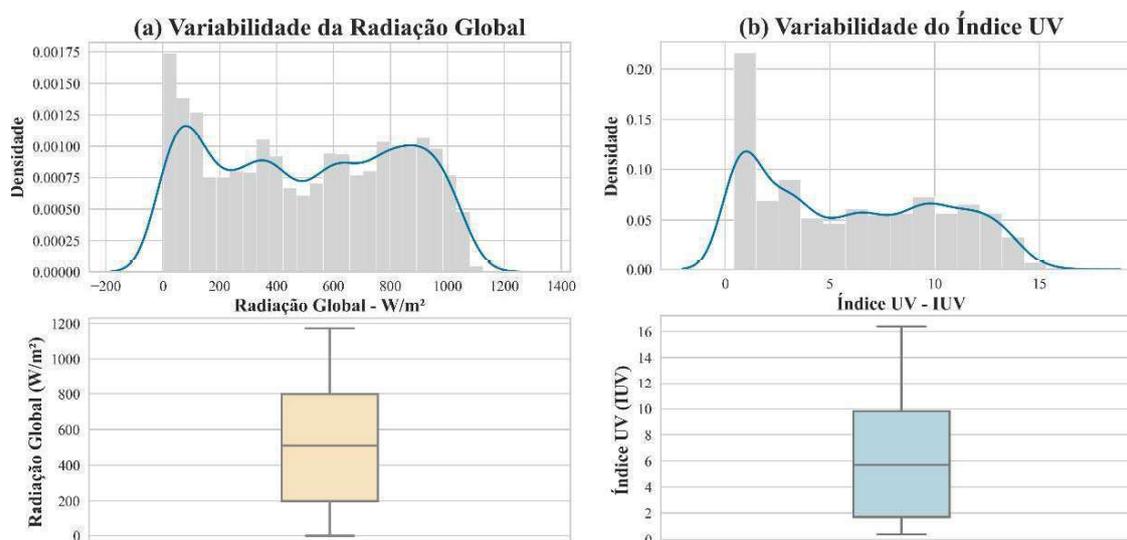


Figura 31 – Distribuição dos dados de radiação global e Índice UV – variação horária

Os valores máximos das variáveis atingiram 1.172,2 W/m^2 para global e 16,4 para IUV, sendo o último um valor considerado extremo por ultrapassar o índice 11, segundo a classificação

de queimaduras de pele proposta pela OMS (Tabela 5). O valor mediano também apresenta índice que configura alto risco à saúde. Observou-se uma grande variabilidade nos dados de radiação global, atingindo mínima e máxima de 0,6 a 1172 W/m², respectivamente.

Tabela 5 – Estatística descritiva horária

	Med	DP	Min	25%	50%	75%	Max
RG	504,1	327	0,6	199,4	510,1	798,5	1172
IUV	6	4,4	0,5	1,7	5,7	9,8	16,4

Legenda: RG = Radiação Global; IUV = Índice Ultravioleta; DP = Desvio padrão; Min = Mínimo; Max = Máximo.

Os registros horários de radiação global (Figura 32a) apresentaram distribuição não normal, com maior ocorrência de dados discrepantes abaixo do quartil inferior, principalmente entre 9h e 16h. Para essa faixa horária, as medianas alcançaram valores entre 350 e 950 W/m² e máxima 1172 W/m² ao meio-dia legal⁷. Já os dados de IUV (Figura 32b) atingiram valores mínimos próximos de zero das 6h às 8h e das 14h às 17h com máxima de 16,4 às 12h. Suas medianas registraram valores máximos acima de 10 entre 10h e 13h.

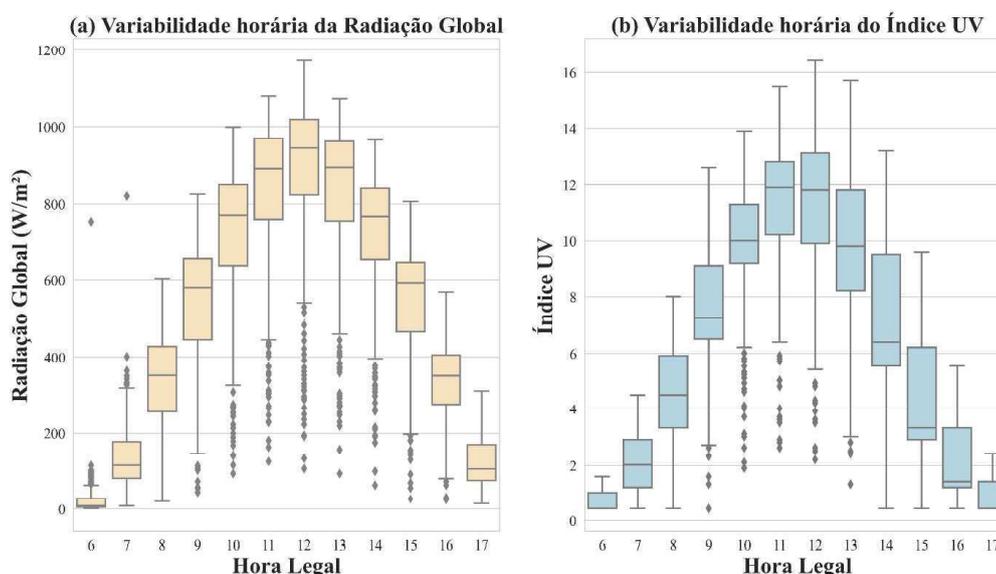


Figura 32 – Boxplot da radiação global e Índice UV – variação horária

⁷ Hora-solar é o tempo medido a partir do ciclo diário do Sol na esfera celeste. Para medir a hora solar aparente, deve-se observar o ângulo horário do Sol Verdadeiro, progredindo o tempo conforme o movimento de leste para oeste. Já a hora legal é a hora oficial escolhida por um governo, para vigorar, permanente ou temporariamente, num dado país ou numa sua região administrativa, que poderá coincidir ou não com o fuso horário do local.

Já entre às 9h e às 13h, as máximas atingiram índices superiores a 12. Índices UV abaixo de 3, considerado o limite mínimo de classificação moderada para queimaduras solares (entre 3 e 6) foram mais frequentes no início do dia, das 6h e 7h e a partir das 15h. Esses dados indicam que, ao longo do ano, os riscos de eritema podem ser agravados, se não forem adotadas medidas protetivas fora desta faixa horária das 8h às 15h. A busca por áreas sombreadas por árvores (Gies *et al.*, 2007) ou por guarda sol (Utrillas *et al.*, 2010), adoção de barreiras físicas (Parisi *et al.*, 2019), uso frequente de filtros solares e de vestimentas que reduzam a área de pele exposta, são estratégias que possibilitam a redução do impacto da incidência de UV na saúde humana.

Para análise das variações mensais, as medianas de radiação global e IUUV apresentaram reduções expressivas, especialmente nos meses de abril a agosto, atingindo valores medianos entre 300 e 600 W/m² (Figura 33a) e 4 e 6, respectivamente (Figura 33b). Ao contrário, as medianas de IUUV atingiram registros próximos de 7, com variação significativa, e 50% dos dados entre 2 e aproximadamente 12 nos meses de janeiro a março e de setembro a dezembro. Durante esse período, a diminuição das medianas está geralmente associada aos efeitos atenuantes da radiação UV devido à prevalência de céu nublado, aumento da frequência de chuvas e maior cobertura de nuvens (Tiba; Leal, 2017). A presença de nuvens, precipitação, alta umidade relativa e outros fatores climáticos podem ter impactado na redução da intensidade da radiação UV e, conseqüentemente, de IUUV.

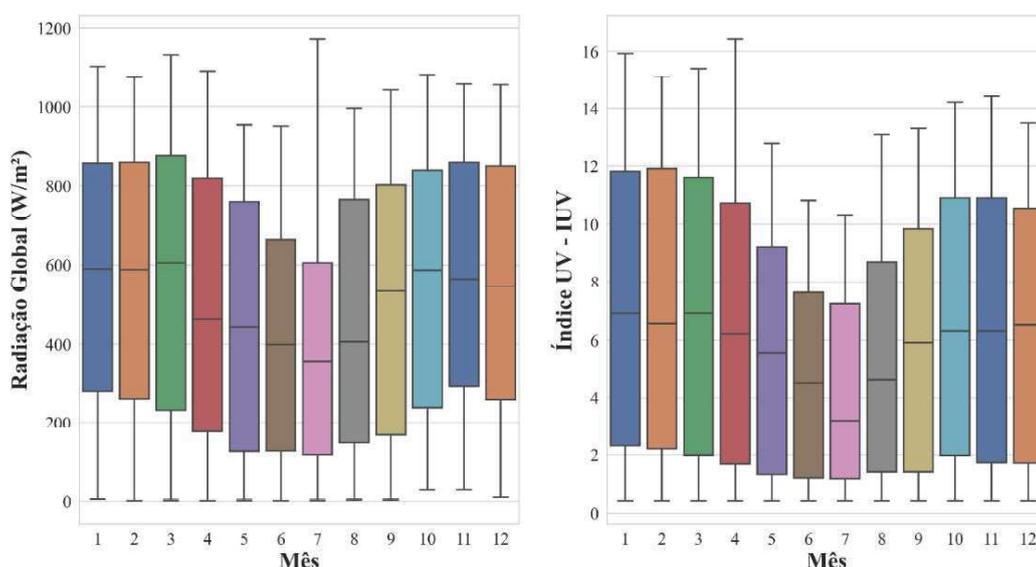


Figura 33 – Boxplot da radiação global e Índice UV – variação mensal

Para as distribuições sazonais, as medianas das variáveis radiação global e IUV apresentaram tendência de crescimento gradativo com valores mais baixos no inverno e outono entre 400 e 500 W/m² para global (Figura 34a) e entre 4 e 5 para IUV (Figura 34b). Já nos períodos da primavera e verão, os valores foram aproximados de 600 W/m² e 6. Averiguar os IUV nos períodos de verão é relevante, especialmente quando se considera seus impactos na saúde da pele, especialmente em áreas costeiras como a cidade de João Pessoa.

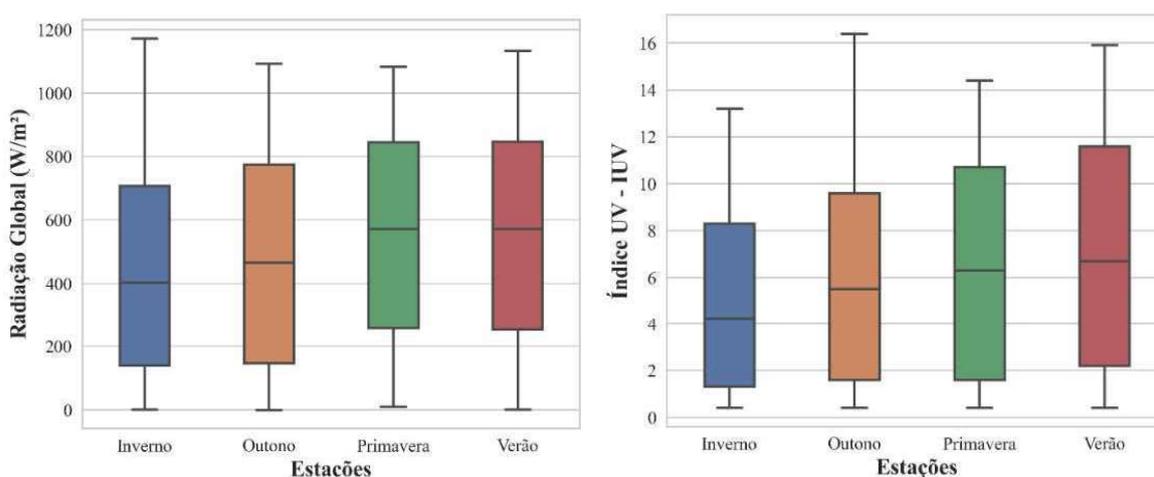


Figura 34– Distribuição dos dados de radiação Global e Índice UV por estação do ano

A intensidade da radiação UV solar no verão tende a ser maior em comparação com outras estações do ano para esta latitude, principalmente porque a inclinação da Terra em relação ao sol resulta em um ângulo mais direto dos raios solares. Ainda, o aumento da área de exposição de pele em cidades litorâneas também é recorrente em função das rotinas diárias neste período, que envolvem atividades ao ar livre, bem como banhos de sol frequentes e prática de esportes, o que destaca a importância na adoção de medidas de proteção (Australia, 2009; Youl; Janda; Kimlin, 2009). Os níveis mais elevados de exposição ao sol e IUV acima de 6 (classificação de alto risco) requerem conscientização e práticas de proteção solar adequadas para reduzir os danos à saúde.

Quando se trata das variações médias diárias da radiação global e IUV (Figura 35), observou-se um comportamento similar entre os dados. Fica evidente a forma assimétrica em ambas as distribuições com concentração nos valores próximos a tendência máxima. Algumas ocorrências foram destacadas como dados espúrios apenas abaixo do limite inferior. As médias máximas alcançadas foram valores próximos a 700W/m² e Índice UV de

8. Além da incidência considerável de radiação global, a média diária de IUUV ultrapassa o limite admissível para exposição solar com ocorrência de eritema.

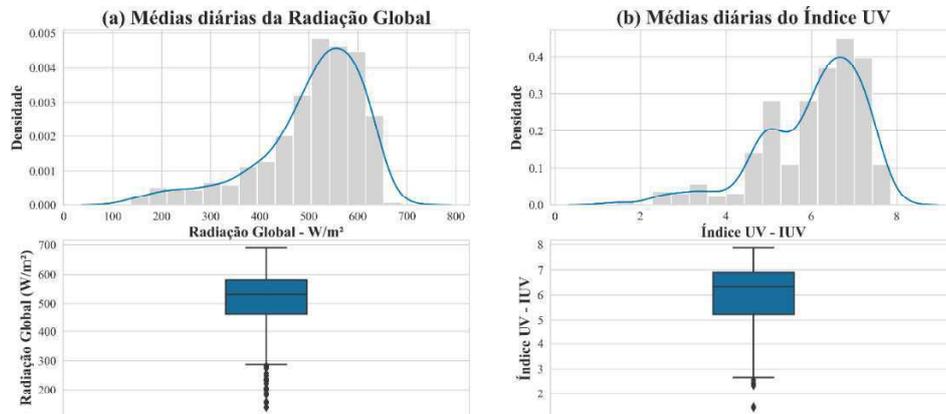


Figura 35 – Distribuição dos dados de radiação Global e Índice UV por médias diárias

4.1.1. Relação anual e sazonal entre Radiação Global e Índice UV

Nesta seção, foi apresentada a dependência entre os valores horários e sazonais de radiação global (RG) e Índice UV (IUUV). O grau de associação entre as variáveis foi analisado por meio do teste de correlação de *Pearson*, revelando uma alta correlação positiva entre as variáveis radiação global e IUUV e atingindo +0,87. Isso sugere que os dados de Índice UV seguem uma tendência linear ascendente quando comparada com o comportamento anual da radiação global, conforme apresentado no gráfico de dispersão ilustrado na Figura 36. Além da tendência linear, os resultados apontaram que o modelo de regressão horário pode ser eficaz na previsão do Índice UV com base na irradiância global.

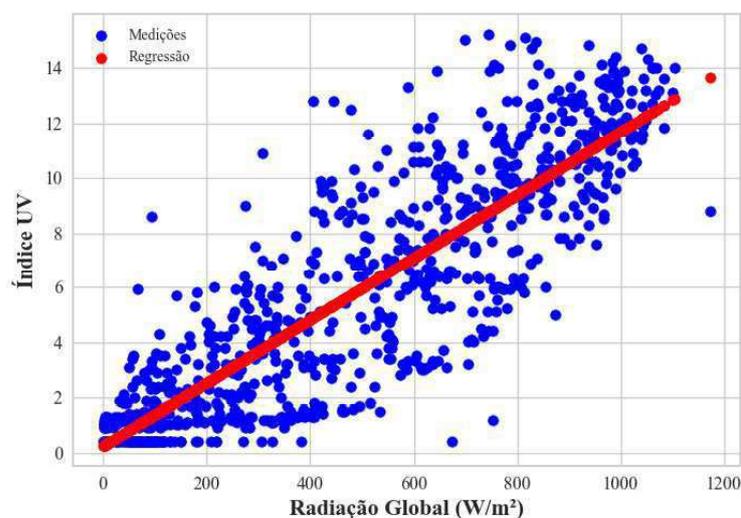


Figura 36 – Modelo de regressão linear entre radiação global e Índice UV – dados horários

O modelo foi expresso na Equação 12. Uma das evidências está no coeficiente de determinação (R^2) que atingiu 0,76, indicando uma explicação significativa da variabilidade em mais de 70%. Proporcionalmente, a relação entre as variáveis (Radiação global/IUV) atinge cerca de 2,8%. No teste de significância individual (Teste t), a estatística apresenta p-valor da constante maior que 0,05 (nível de significância), rejeitando a hipótese de que pode ser estatisticamente igual a zero. Assim, o modelo foi reajustado eliminando a constante. Para avaliar a magnitude dos erros de previsão, foram adotadas as métricas RMSE e MAE. O MAE resultou em 1,63 como um indicativo de que, em média, as previsões têm um erro absoluto de 1,63 unidades em relação aos valores reais de IUV (adimensionais) e o RMSE atingiu 2,16.

$$IUV = 0,028 * RG - R^2: 0,76 \text{ (Equação 12);}$$

$$RMSE: 2,16; MAE: 1,63$$

$$Pearson = +0,87$$

No panorama nacional, a relação das variáveis horárias para as cidades de Recife/PE, Maceió/AL e Botucatu/SP (ESCOBEDO *et al.*, 2009; LEAL, 2011; PORFIRIO *et al.*, 2010; TIBA; LEAL, 2012, 2017) apresentaram estimativas aproximadas com as registradas na cidade de João Pessoa/PB. Enquanto este estudo registrou uma relação percentual de 2,8%, as demais cidades atingiram entre 3% e 5,2%, com altos coeficientes de determinação (acima de 0,90). Em complemento, todas as pesquisas destacaram as possíveis alterações em função das características locais e regionais.

Os modelos de regressão sazonal foram ilustrados nos gráficos de dispersão das estações verão e primavera (Figura 37) e outono e inverno (Figura 38). Os resultados da regressão linear entre o Índice UV (IUV) e a radiação global (RG) para as estações de verão e primavera apresentaram informações significativas sobre as associações entre as variáveis (Figuras 37a e 37b). Observou-se uma alta correlação positiva nas duas estações, obtendo uma boa relação de efeito por meio do teste de correlação com +0,82 e +0,78, respectivamente. Estes coeficientes indicam que as modificações na radiação global estão fortemente associadas ao Índice UV, em ambas as estações.

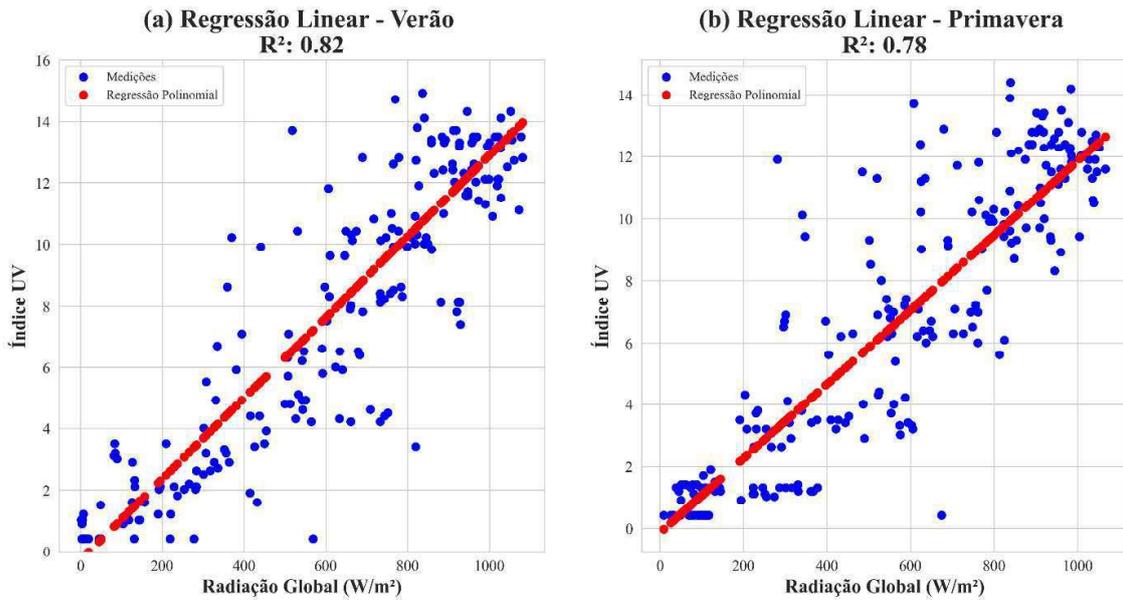


Figura 37 – Modelo de regressão entre radiação global e Índice UV - (a) verão e (b) primavera

$$IUV_{ver\tilde{a}o} = -0,27 + 0,013 * RG \text{ (Equação 13);}$$

$$RMSE = 2,0; MAE = 1,4; Pearson = + 0,91$$

$$IUV_{primavera} = -0,24 + 0,025 * RG \text{ (Equação 14);}$$

$$RMSE = 2,09; MAE = 1,53; Pearson = + 0,87$$

Os gráficos de dispersão apontam para uma proximidade dos dados medidos à reta de regressão com variabilidade moderada para verão e primavera. Como mencionado anteriormente, os meses que configuram tais estações apresentaram aproximações nas medianas e valores máximos comparados aos demais. Conforme o coeficiente de determinação, cerca de 82% da variabilidade do IUV é explicada pelas mudanças na radiação global no verão, enquanto na primavera sugere um bom ajuste com 0,78, acima de 70%. Assim, os modelos indicam que a radiação global pode ser considerada bom preditor do IUV para estas estações, mesmo com maior concentração dos dados nos valores mínimos e máximos. Quanto à previsão de erros, o MAE se aproxima de 1,5, enquanto o RMSE atinge valores próximos de 2.

Para as estações de inverno e outono, apesar do alto grau de associação resultando do teste de correlação (+0,85 e +0,80), estas exibiram uma menor acurácia. Os coeficientes de determinação nestes modelos de regressão atingiram valores menores que 70% quando

comparada com as anteriores, sendo 0,63 e 0,68, respectivamente (Equações 15 e 16), podendo ser verificada pelo gráfico de dispersão (Figura 38).

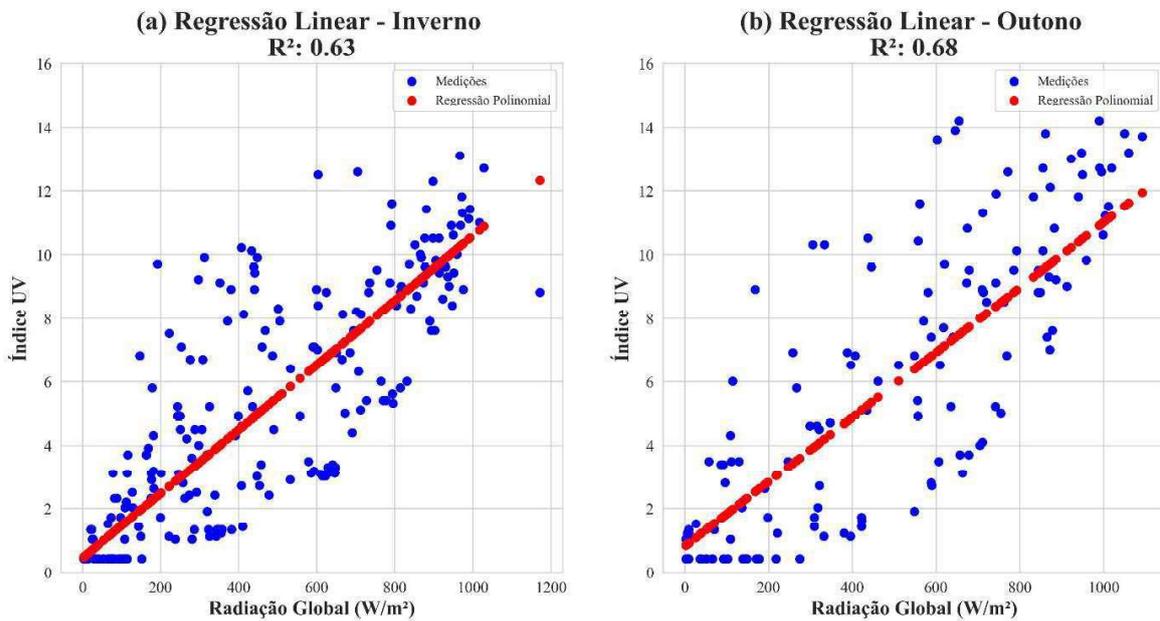


Figura 38 – Modelo de regressão entre radiação global e Índice UV – (a) inverno e (b) outono

$$IUV_{inverno} = 0,90 + 0,009 * RG \text{ (Equação 15);}$$

$$RMSE = 2,2; MAE = 1,68 \text{ Pearson} = + 0,85$$

$$IUV_{outono} = 0,66 + 0,011 * RG \text{ (Equação 16);}$$

$$RMSE = 2,52; MAE = 1,93 \text{ Pearson} = + 0,80$$

Um dos motivos para esta baixa eficácia está possivelmente na interferência do vapor de água e aumento da nebulosidade. Na escala sazonal, a radiação global apresenta uma variação maior que a radiação UV devido à sua maior atenuação pelas nuvens. Estas alterações podem estar diretamente relacionadas à outras variáveis que não foram inseridas no modelo, a exemplo dos aerossóis e coluna total de ozônio. Os erros referentes ao RMSE de e MAE sugerem que o modelo de regressão tem uma precisão razoável na estimativa do IUV com base na radiação global. Esses valores indicam que, em média, as previsões do modelo têm erros de aproximadamente 2 unidades (RMSE) ou 1,5 unidades (MAE) em relação aos valores reais do IUV.

4.1.2. Relação diária e mensal entre Radiação Global e Índice UV

O modelo linear referente às médias diárias apresentou relações dispersas nos valores mais baixos e uma maior concentração à medida que os dados aumentam. Apesar disso, as variáveis registraram correlação alta, com +0,87, demonstrando uma tendência de crescimento, em conformidade com os demais modelos apresentados (horário e sazonais). O poder explicativo do modelo é considerado moderado, com R^2 de 0,68. Esta redução se deu pela maior variação dos dados nos meses de inverno e outono. Ainda, percebeu-se uma baixa ocorrência de erros de predição (RMSE = 0,65; MAE = 0,52), sugerindo uma boa previsão do modelo (Figura 39 e Equação 17).

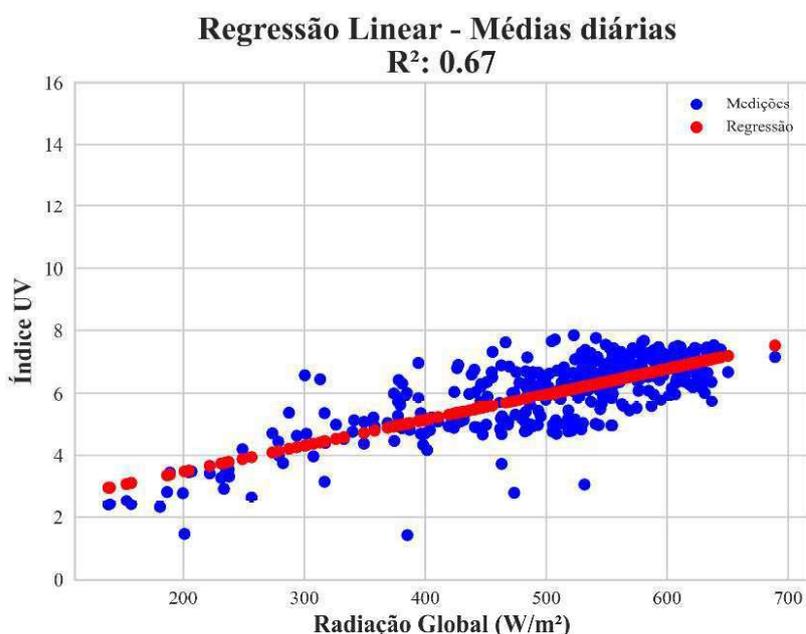


Figura 39 – Modelo de regressão entre radiação global e Índice UV – médias diárias

$$IUUV_{diário} = 1,84 + 0,02 * RG \text{ (Equação 17);}$$

$$RMSE = 0,65; MAE = 0,52 - Pearson = + 0,87$$

A Figura 40 e a Tabela 6 apresentam os principais resultados da relação entre radiação global e IUUV em cada mês com base nos resultados do teste de correlação de Pearson, coeficiente de determinação (R^2) e métricas de erros (RSME e MAE). Os meses de melhor desempenho entre as variáveis foram os que configuram a estação verão – janeiro, fevereiro e dezembro.

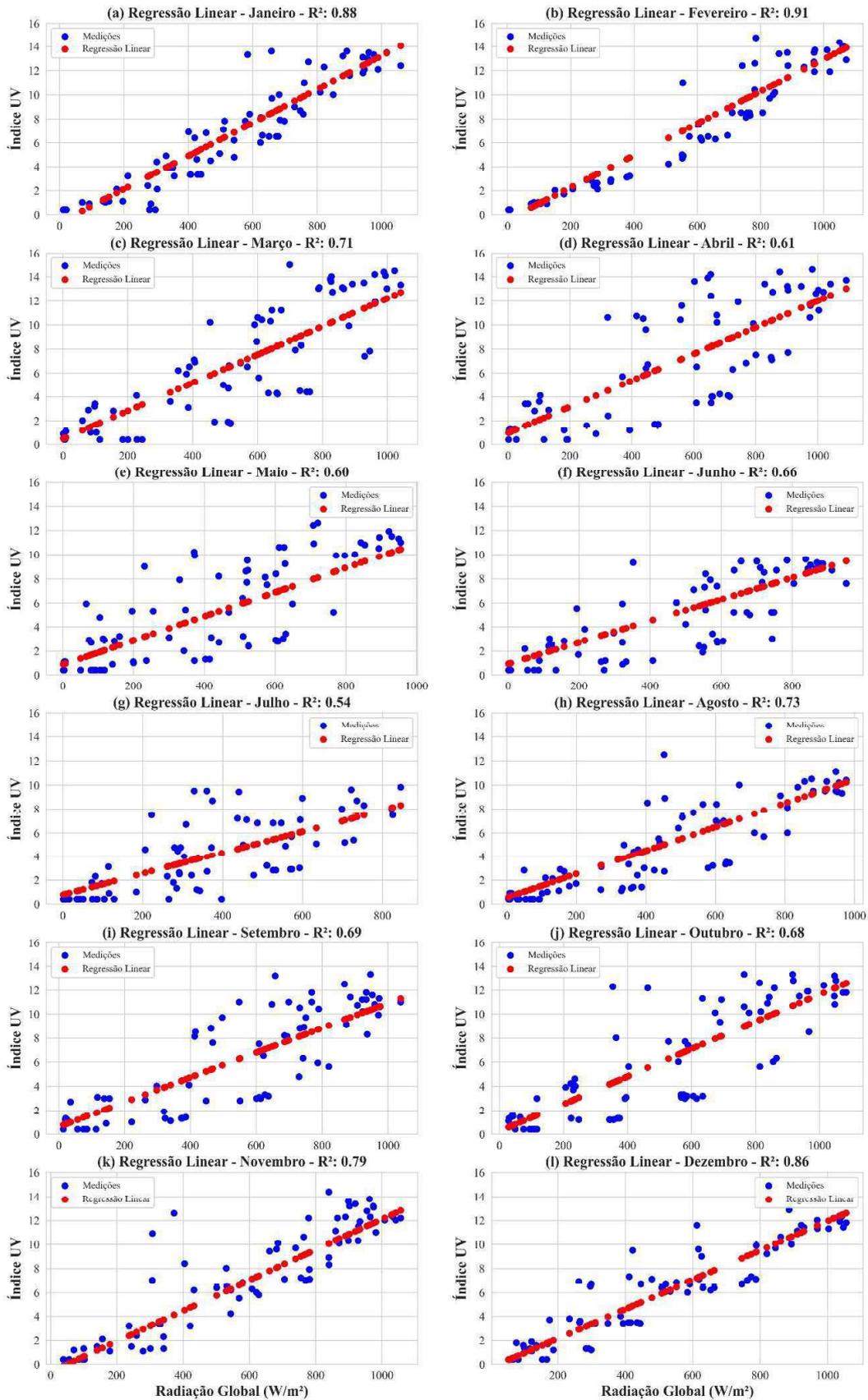


Figura 40 – Modelos de regressão linear mensais

Tabela 6 – Relação entre Radiação Global e IUV mensal – correlação, coeficiente de determinação e métricas de erros

Mês	Correlação de Pearson	R ² **	RMSE**	MAE***
Janeiro	0,94	0,88	1,55	1,19
Fevereiro	0,94	0,91	1,41	1,08
Março	0,85	0,71	2,59	2,15
Abril	0,80	0,61	3,00	2,50
Maio	0,81	0,60	2,54	2,11
Junho	0,80	0,66	1,95	1,55
Julho	0,80	0,54	2,06	1,63
Agosto	0,88	0,73	1,86	1,35
Setembro	0,84	0,69	2,32	1,88
Outubro	0,82	0,68	2,50	2,00
Novembro	0,91	0,79	2,03	1,41
Dezembro	0,89	0,86	1,45	1,07

Legenda: *R² = Coeficiente de determinação; **RSME = Erro Quadrático Médio da Raiz; *MAE = Erro Médio Absoluto.**

Além dos melhores resultados entre as métricas dos erros (RSME e MAE abaixo de 1,50), os meses de janeiro, fevereiro e dezembro também obtiveram maiores coeficientes de determinação com R² superiores a 0,85, onde a maioria da variabilidade na variável de resposta (IUV) é explicada pelo modelo. Isso demonstra o quão bem o modelo se ajusta aos dados observados. Observou-se ainda o alto grau de associação positiva entre as variáveis, atingindo valores próximos a 0,90.

Quanto à qualidade do ajuste do modelo de regressão para os meses de março, abril, maio e outubro, os coeficientes R² variaram entre 59% e 71%, ou seja, sugere que o modelo tem algum poder de previsão, mas não é um ajuste significativo, e ainda explica moderadamente a variabilidade nos dados. As métricas de erros RMSE e MAE referente a esses meses resultaram em valores próximos de 3, variando entre 2,50 e 3, tendo como referência a classificação dos IUV para ocorrências de queimaduras. Esses meses assumiram erros mais altos comparados aos meses de verão. Esse recorte temporal apresentou maior dispersão dos dados, mesmo com correlações alta. Isso pode ter gerado inconsistências no modelo em função de outros fatores atenuadores da radiação UV, como condições de céu encoberto e nebulosidade que se inicia nos meses de outono e perduram por grande parte do período de inverno, o que acarretam reduções dos índices UV.

4.2. Intercomparação entre instrumentos de medição: SENSU versus GUV (Equipamento referência – INPE)

A validação do instrumento Confortímetro SENSU com sensor UV ML8511 foi realizada comparando com dados levantados concomitantemente aos medidos no radiômetro *Ground Ultraviolet* - GUV-2511. Foram definidas como variáveis: a radiação UV (UV_{SENSU}) e índice UV do SENSU (IUV_{SENSU}), e o Índice UV (IUV_{GUV}), radiação UVA (UVA_{GUV}) e a radiação UVB (UVB_{GUV}) do GUV. Após passar por triagem, remoção de dados ausentes e ajustes necessários, resultou-se em uma amostra final com 1924 registros, sendo 481 por variável. Os dados de radiação UV medidos no SENSU foram convertidos em Índice Ultravioleta, com base a aplicação da Equação 3 apresentada no tópico 3.3.4. Após conversão, os dados do SENSU foram relacionados com os dados de saída do GUV.

Na análise da distribuição dos dados, verificou-se uma tendência a não normalidade, uma vez que os resultados do teste Shapiro-Wilk apresentaram valores-p menores que o nível de significância de 0,05. A assimetria também foi identificada com a representação do gráfico boxplot, o qual também indicou a presença de ocorrências discrepantes acima do limite superior, em particular para os dados do instrumento SENSU (Figura 41). Os resultados dos principais parâmetros estatísticos para variáveis são apresentados na Tabela 7. Os valores médios foram bem semelhantes com pequenas diferenças entre as medianas das variáveis referente aos IUV dos instrumentos. Percebeu-se também valores mínimo e máximos aproximados, com ressalva para os dados discrepantes encontrados nas medições do SENSU.

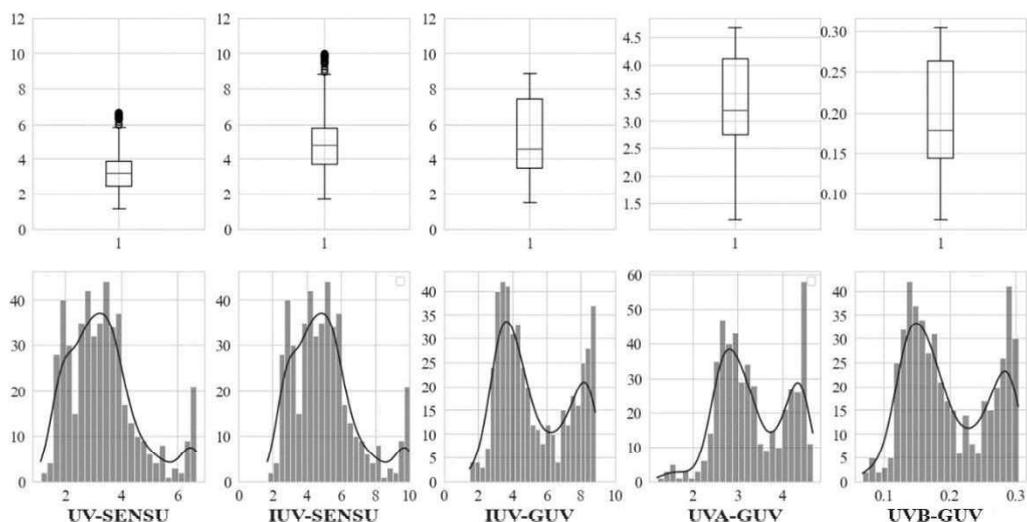


Figura 41 – Distribuição dos dados levantados no SENSU-ML8511 e GUV-2511

Tabela 7 – Estatística descritiva

	UV _{SENSU}	IUV _{SENSU}	IUV _{GUV}	UVA _{GUV}	UVB _{GUV}
Média	3,35	5,02	5,28	3,34	0,20
Mediana	3,2	4,80	4,58	3,19	0,17
Desvio Padrão	1,26	1,25	1,88	0,77	0,06
Mínimo	1,13	1,69	1,50	1,24	0,07
Máximo	6,67	9,99	8,84	4,77	0,31
Shapiro Wilk (P-Valor)	9,35e-15*	9,41e-15*	2,81e-17*	3,94e-13*	4,92e-16*

*Não apresentam distribuição normal

A Figura 42 ilustra o mapa de calor com os resultados da correlação pareadas das variáveis, utilizando o teste de Spearman. O coeficiente de correlação de Spearman, sendo uma medida não paramétrica, é particularmente útil quando as relações entre variáveis não seguem uma distribuição linear. Nesse contexto, os valores obtidos, de 0,82 e 0,84, sugerem uma associação significativa entre as variáveis, reforçando a força dessa relação não linear. Esses resultados indicam uma correlação alta (acima de 0,80) e positiva entre as variáveis dos dois instrumentos.

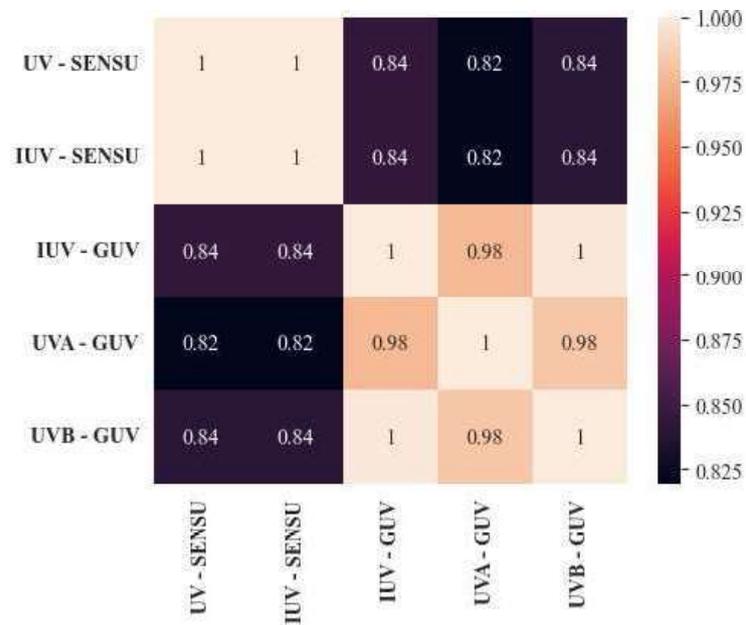


Figura 42 – Mapa de calor do teste de Spearman – Correlação entre variáveis

Com intuito de verificar possíveis similaridades no comportamento dos dados, foram realizados testes de hipóteses não paramétrico de Mann-Whitney, apresentados na Tabela 8. O comparativo entre IUV_{SENSU} e IUV_{GUV} resultou em um p-valor igual a 0,2079, sendo maior que o nível de significância de 0,05. Desta forma, concluiu-se que não há evidência suficiente para afirmar que as amostras foram desenhadas de populações diferentes ou não existe diferença estatística entre as medianas dos grupos. Os demais comparativos refutaram a hipótese nula de igualdade entre as medianas.

Tabela 8 – Resultado do teste de Spearman e Teste de Hipótese Mann-Whitney

Instrumentos	Correlação de Spearman	Teste de Mann-Whitney (P-valor)	Resultado do teste
IUV_{SENSU} x IUV_{GUV}	0,84 (Alta)	0,2079 ($P > 0,05$)	Semelhança estatística entre as medianas dos grupos
UV_{SENSU} x UVA_{GUV}	0,82(Alta)	8,197 ⁻⁵⁶ ($P < 0,05$)	Diferença estatística entre as medianas dos grupos
UV_{SENSU} x UVB_{GUV}	0,84 (Alta)	9,208 ⁻¹⁵⁹ ($P < 0,05$)	Diferença estatística entre as medianas dos grupos

Para construção dos modelos de regressão, os dados foram estrategicamente divididos, atribuindo 80% deles para o conjunto de treinamento e os 20% restantes para o conjunto de teste a fim de aprimorar a capacidade de generalização do modelo. Essa abordagem é fundamental para garantir que o modelo seja capaz de lidar eficazmente com novos dados, proporcionando resultados mais confiáveis, robustos e aplicáveis em outros cenários. Foram realizados três modelos de regressão polinomial, os quais relacionaram duas variáveis por instrumento. Os modelos estão apresentados nos tópicos 4.2.1, 4.2.2 e 4.2.3.

4.2.1. Índice UV SENSU versus Índice UV GUV

Conforme aplicação de teste de hipóteses Mann-Whitney expostos no tópico anterior, os dados de IUV_{SENSU} e IUV_{GUV} apresentaram semelhanças estatísticas quando avaliadas a distribuição dos dados e suas medianas. Como observado no resultado do teste de correlação de Spearman, a relação entre as variáveis mostra uma tendência de crescimento alta e positiva ($\rho = 0,84$), mesmo não apresentando uma relação linear. Em complemento, a Figura 43 ilustra o gráfico de dispersão, o qual podem ser identificados padrões, tendências e agrupamentos dos dados do experimento. Diante da não-linearidade, foi adotado um modelo de regressão polinomial para a análise do desempenho dos registros do instrumento SENSU em função do GUV.

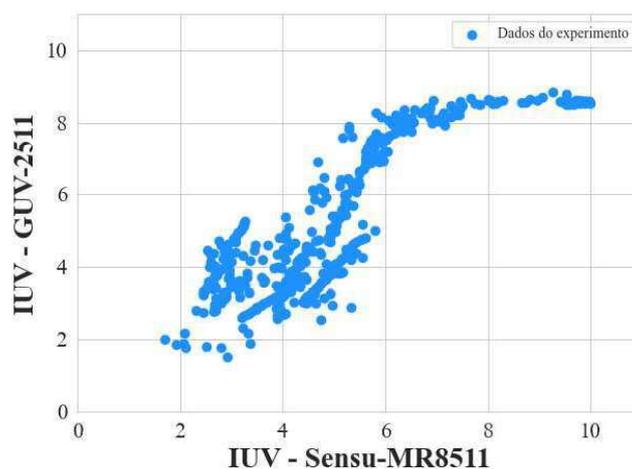


Figura 43 – Gráfico de dispersão com amostra total do experimento – IUV_{SENSU} e IUV_{GUV}

A análise se concentrou na identificação do modelo que melhor se ajustou aos dados coletados, criando modelos polinomiais de grau 1, 2 e 3 sendo linear, quadrático e cúbico, respectivamente. Após ajustar os modelos ao conjunto de dados de treinamento com 80% dos registros, o desempenho de cada um foi avaliado adotando métricas como Coeficiente de Determinação (R^2), erro médio absoluto (MAE), Erro Percentual Absoluto Médio (MAPE), erro quadrático médio (MSE) e raiz do erro quadrático médio (RMSE). Os modelos polinomiais com conjunto de dados de teste com 20% da amostra foram apresentados na Figura 44.

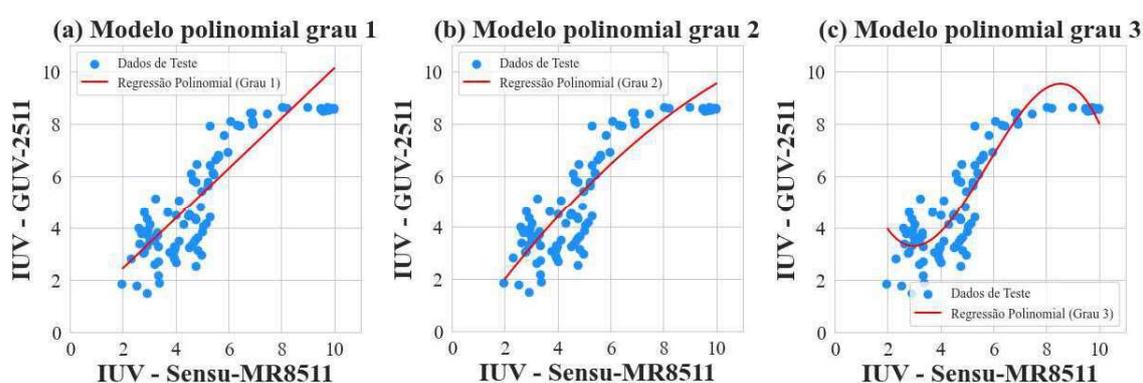


Figura 44 – Modelos polinomiais grau 1, 2 e 3 com conjunto de dados de teste - IUV_{SENSU} e IUV_{GUV}

Os resultados das métricas indicaram que o modelo polinomial de grau 3 apresentou melhor desempenho e foi escolhido para representar a relação entre os dados de Índice UV extraídos nos instrumentos. Com score de R^2 mais elevado, o modelo cúbico demonstrou

que aproximadamente 82,5% da variabilidade nos dados pode ser explicada pela regressão, indicando uma adaptação mais eficaz. As métricas RSME, MSE, MAE e MAPE confirmaram a eficácia do modelo de grau 3, com registro dos menores erros e precisão das previsões mais favoráveis em comparação aos demais graus (Tabela 9).

Tabela 9 – Resultado das métricas de desempenho dos modelos polinomiais - IUV_{GUV} e IUV_{SENSU}

Grau do modelo polinomial	Coefficiente de Determinação (R ²)	RSME	MSE	MAE	MAPE
Grau 1	0,74	1,10	1,23	0,95	0,23
Grau 2	0,78	1,06	1,14	0,90	0,228
Grau 3	0,83	0,91	0,83	0,73	0,20

As estimativas, os erros padrão, as estatísticas de teste com o p-valor e os intervalos de confiança da constante/intercepto e demais estimadores são apresentados no sumário descritivo do modelo na Tabela 10. A Equação 18 representa a relação matemática entre as variáveis IUV_{GUV} e IUV_{SENSU} formada a partir do modelo de regressão. O coeficiente negativo (-5,49) sugere uma influência significativa na redução do Índice UV. De acordo com a estatística de teste (t), todos os coeficientes foram nulos e significativos com p-valor menor que o nível de significância de 0,05.

Tabela 10 – Descrição do modelo polinomial grau 3 - IUV_{GUV} e IUV_{SENSU}

Variáveis	Estimativas	Erro padrão	Estatística de Teste (t)	P-valor (P > z)	2,5%	97,5%
Constante	10,65	0,908	11,735	0	8,87	12,44
IUV_{SENSU}	-5,58	0,536	-10,415	0	-6,63	-4,53
IUV_{SENSU}²	1,26	0,097	12,959	0	1,07	1,45
IUV_{SENSU}³	-0,07	0,005	-13,471	0	-0,08	-0,06

A equação do modelo é dada por:

$$IUV_{GUV} = 10,65 - 5,57 * IUV_{SENSU} + 1,26 * IUV_{SENSU}^2 - 0,07 * IUV_{SENSU}^3 + \epsilon$$

(Equação 18)

Após a aplicação do modelo polinomial (Figura 45a), procedeu-se para a análise dos resíduos com intuito de avaliar a qualidade e a validade do modelo. Foram verificados três pressupostos da regressão, sendo eles: a independência, homoscedasticidade e a normalidade. O teste de Durbin-Watson foi utilizado para verificar a presença de autocorrelação nos resíduos, enquanto o teste de Goldfeld-Quandt foi empregado para

avaliar a homoscedasticidade (Figura 45b). Na sequência, o teste de Shapiro-Wilk foi aplicado para avaliação da normalidade dos resíduos, complementado pelos gráficos de histogramas e boxplot ilustrados na Figura 45, gráficos c e d.

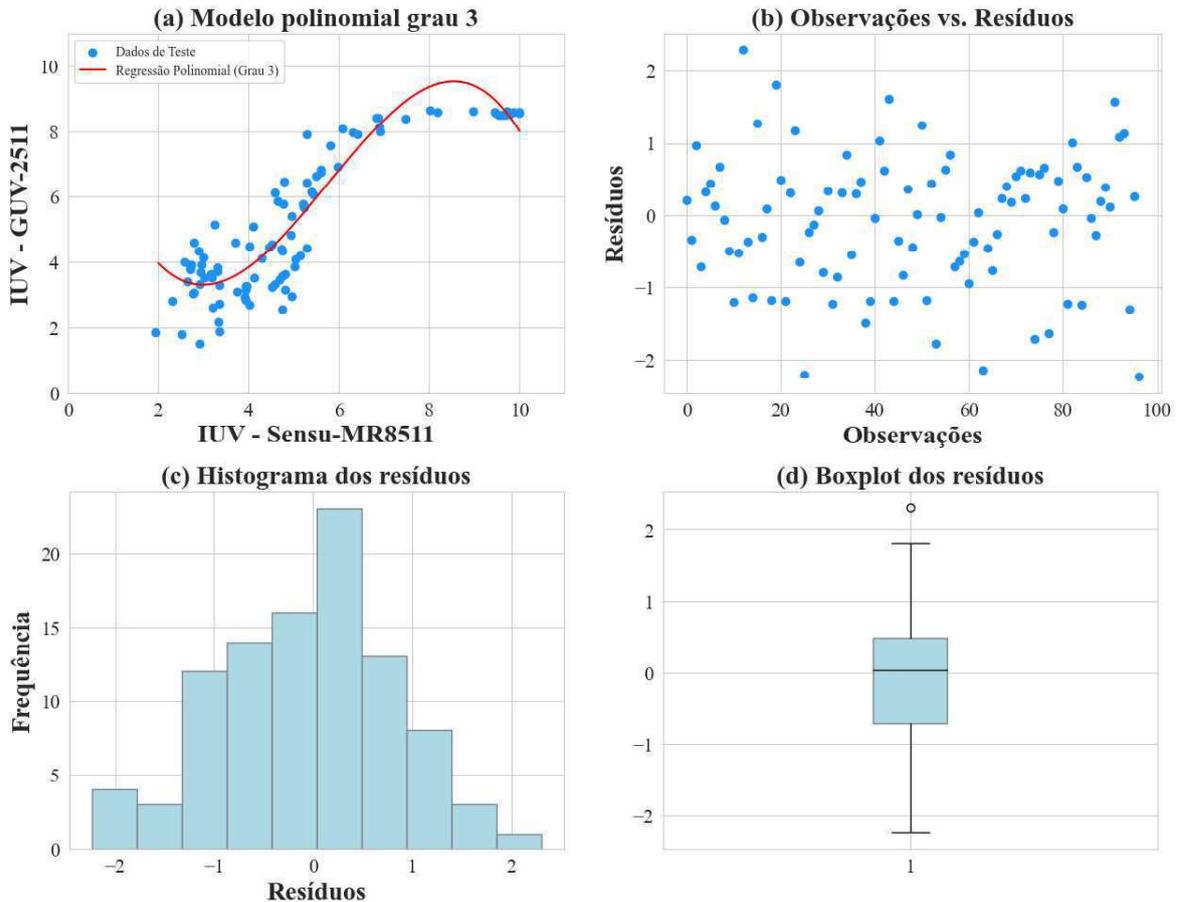


Figura 45 – Modelo polinomial grau 3, Observações vs. Resíduos, Histograma e boxplot dos resíduos – IUV_{SENSU} X IUV_{GUV}

Os resultados dos testes aplicados aos resíduos do modelo demonstraram ausência de autocorrelação significativa, com estatística de teste equivalente à 2,08 (Durbin-Watson com valor próximo ao 2). Quanto à homoscedasticidade (Goldfeld-Quandt – Estatística de teste = 0,9766 e P-valor = 0,5308), o p-valor sugere que não há evidência significativa contra a homoscedasticidade, concluindo que a variância dos resíduos é constante. Na Figura 45b, é possível notar que existe uma tendência na dispersão dos pontos em relação a linha horizontal zero, concentrados entre -2 e 2. Ainda, os resíduos se aproximam de uma distribuição normal com p-valor acima do nível de significância de 0,05 (Shapiro-Wilk – p-valor = 0,5683). Essa análise, corroborada pelos resultados dos testes estatísticos expostos,

evidenciou a adequação dos resíduos aos pressupostos do modelo. Isso assegura que a regressão não apenas se ajustaram aos dados de treinamento, mas também que os resíduos apresentaram comportamento condizente, fortalecendo a confiança na interpretação e generalização do modelo.

4.2.2. UV SENSU *versus* UVA GUV

A relação entre as medições de radiação UV_{SENSU} e UVA_{GUV} indicou que as medianas e a distribuição dos dados dos grupos não apresentaram semelhanças estatísticas. Apesar dessa relação seguir uma tendência de crescimento alta e positiva ($\rho = 0,82$), por meio do teste de Spearman, os modelos polinomiais, representados graficamente na Figura 46, não apresentaram coeficientes de determinação com bom desempenho. Todas as regressões, seja linear, quadrática ou cúbica, resultaram em R^2 abaixo de 0,68, tendo maior desempenho o de grau 3. Quanto às outras métricas de desempenho, foram observados valores de erros abaixo de 1 (Tabela 11).

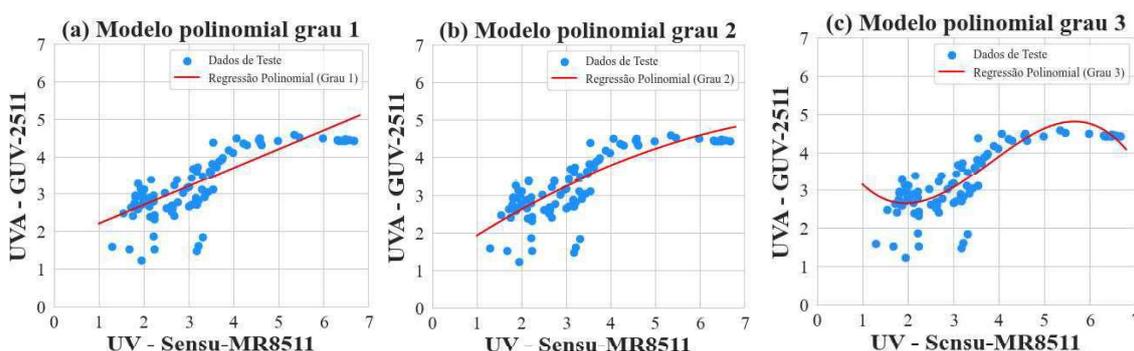


Figura 46 – Modelos polinomiais grau 1, 2 e 3 com conjunto de dados de teste - UV_{SENSU} X UVA_{GUV}

Tabela 11 – Resultado das métricas de desempenho dos modelos polinomiais

Grau do modelo polinomial	Coefficiente de Determinação (R^2)	RSME	MSE	MAE	MAPE
Grau 1	0,60	0,54	0,29	0,43	0,16
Grau 2	0,63	0,52	0,27	0,40	0,16
Grau 3	0,68	0,48	0,24	0,34	0,14

Diante dos resultados apresentados, foram realizadas as análises dos resíduos das três regressões polinomiais uma vez que é caracterizado como critério determinante para validação de um modelo. Observou-se que os pressupostos de homogeneidade e autocorrelação não foram violados com valores de estatística de Durbin-Watson próximos

de 2 (2,03; 2,08 e 1,95) e com p-valor no teste de Goldfeld-Quandt acima do nível de significância de 0,05 (Tabela 12).

Tabela 12 – Resultado dos testes de análise de resíduos - UV_{SENSU} X UV_{AGUV}

Grau do modelo	Durbin-Watson – Estatística de teste	Goldfeld-Quandt – Estatística de teste	Shapiro-Wilk – P-valor
Grau 1	2,03	1,58; P-Valor=0,06	0,0002
Grau 2	2,08	1,64; P-Valor=0,05	<0,05
Grau 3	1,95	1,62; P-Valor=0,06	<0,05

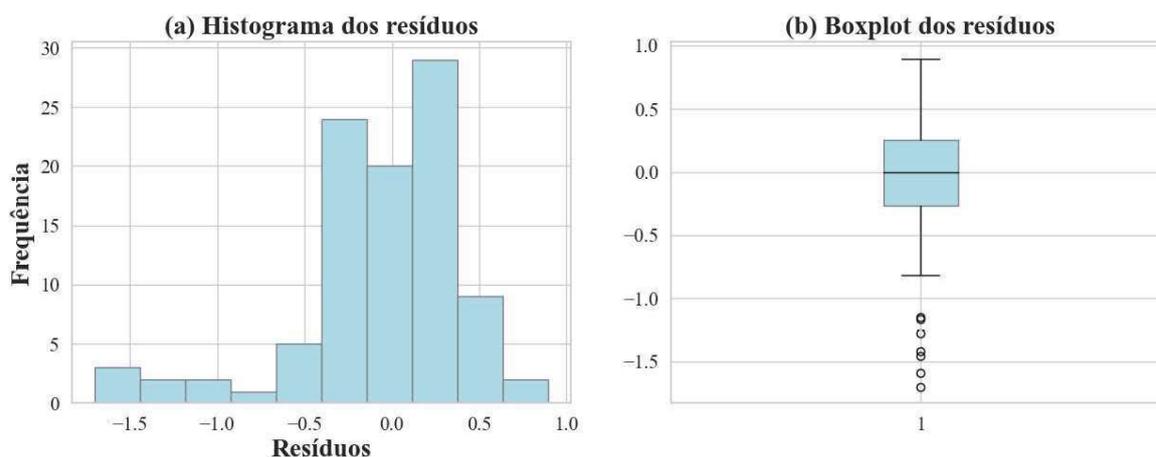


Figura 47 – Histograma e boxplot dos resíduos – UV_{SENSU} X UV_{AGUV}

Mesmo não apresentando heterogeneidade nos resíduos e tendência à autocorrelação, nenhum dos modelos apresentou normalidade dos resíduos, confirmados pelo resultado de teste de validação Shapiro-Wilk com p-valor abaixo do nível de significância de 0,05. O resultado também pode ser observado com a distribuição dos resíduos em histograma e boxplot representado na Figura 47. A presença de dados discrepantes abaixo dos valores mínimos reforça a assimetria no comportamento dos registros, variando de -1,5 a 1. A violação desse pressuposto inviabiliza a utilização do modelo, o qual relaciona dados de radiação UV com os valores de UVA medidos no SENSU e GUV, respectivamente.

4.2.3. UV_{SENSU} versus $UV_{B GUV}$

Do mesmo modo que os testes anteriores, a correlação de Spearman entre os dados de UV_{SENSU} e $UV_{B GUV}$ também indicou forte relação positiva entre as variáveis ($\rho = 0,84$). Isso sugere que quando uma variável aumenta, a outra tende a aumentar, seguindo uma

tendência de crescimento. A Figura 48 ilustra o gráfico de dispersão entre as variáveis, também registrando uma tendência à não linearidade.

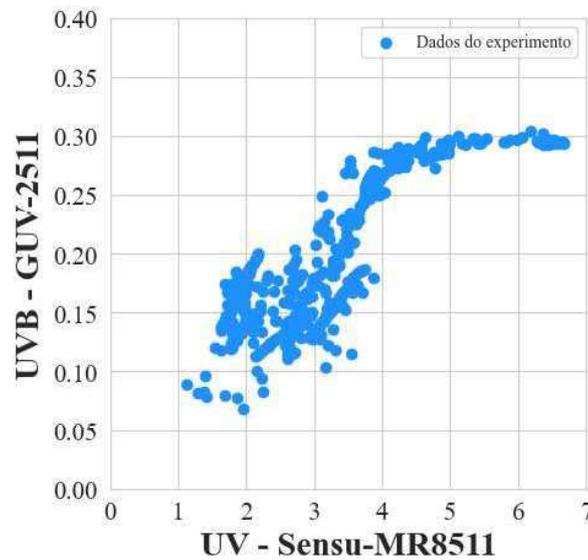


Figura 48 - Gráfico de dispersão com amostra total do experimento – UV_{SENSU} e UVB_{GUV}

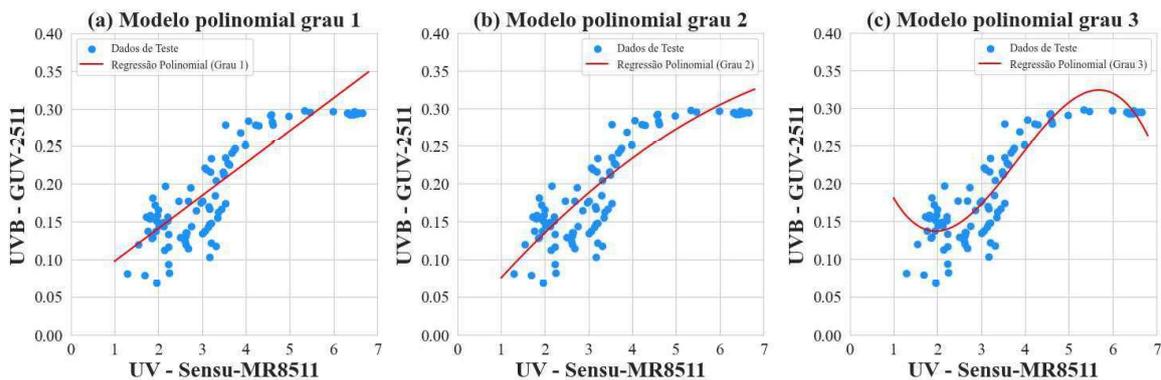


Figura 49 – Modelos polinomiais grau 1, 2 e 3 com conjunto de dados de teste

Os coeficientes de determinação (R^2) registraram valores de 0,71, 0,73 e 0,80 referentes aos modelos linear, quadrático e cúbico (Figura 49). Observa-se um aumento do R^2 à medida que aumenta o grau do polinômio. Ao contrário, ocorreu com as métricas que avaliam a precisão das previsões onde ocorre a redução de erros no polinômio de maior grau. O modelo polinomial de grau 3 apresentou melhores métricas de desempenho com poder de resposta atingindo 80% da variabilidade dos dados. As métricas RSME, MSE, MAE e MAPE confirmaram a eficácia do modelo de grau 3, com registro dos menores erros e

precisão mais favoráveis em comparação aos demais graus. Os resultados das métricas de desempenho dos modelos polinomiais foram apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 – Resultado das métricas de desempenho dos modelos polinomiais

Grau do modelo polinomial	Coefficiente de Determinação (R ²)	RSME	MSE	MAE	MAPE
Grau 1	0,71	0,03	0,001	0,30	0,19
Grau 2	0,73	0,03	0,001	0,28	0,18
Grau 3	0,80	0,03	0,0009	0,023	0,16

As estimativas, os erros padrão, as estatísticas de teste com o p-valor e os intervalos de confiança da constante/intercepto e demais estimadores são apresentados no sumário descritivo do modelo na Tabela 14. A relação matemática do modelo polinomial entre as variáveis UVB_{GUV} e UV_{SENSU} está representada na Equação 19. Os coeficientes negativos (-0,243 e -0,007) sugerem uma influência significativa na redução da radiação UVB. De acordo com a estatística de teste (t), todos os coeficientes são significativos com p-valor menor que o nível de significância de 0,05.

Tabela 14 – Descrição do modelo polinomial grau 3 entre UVB_{GUV} e UV_{SENSU}

Variáveis	Estimativas	Erro padrão	Estatística de Teste (t)	P-valor (P > z)	2,5%	97,5%
Constante	0,347	0,029	12,049	0	0,291	0,405
UV_{SENSU}	-0,243	0,026	-9,503	0	-0,293	-0,192
UV_{SENSU}²	0,083	0,007	11,978	0	0,07	0,097
UV_{SENSU}³	-0,007	0,001	-12,53	0	-0,008	-0,006

A equação do modelo é dada por:

$$UVB_{GUV} = 0,347 - 0,243 * UV_{SENSU} + 0,083 * UV_{SENSU}^2 - 0,007 * UV_{SENSU}^3 + \varepsilon \text{ (Equação 19)}$$

A Figura 50 representa os gráficos do modelo polinomial, a relação entre as observações e os resíduos, e o histograma e boxplot dos resíduos. Com base nos testes para avaliação dos resíduos do modelo de regressão, a estatística de Durbin-Watson, que verifica a existência a autocorrelação entre os resíduos, revelou valores próximos a 2 para todos os graus do polinômio (grau 3 = 2,05), indicando a ausência de autocorrelação significativa.

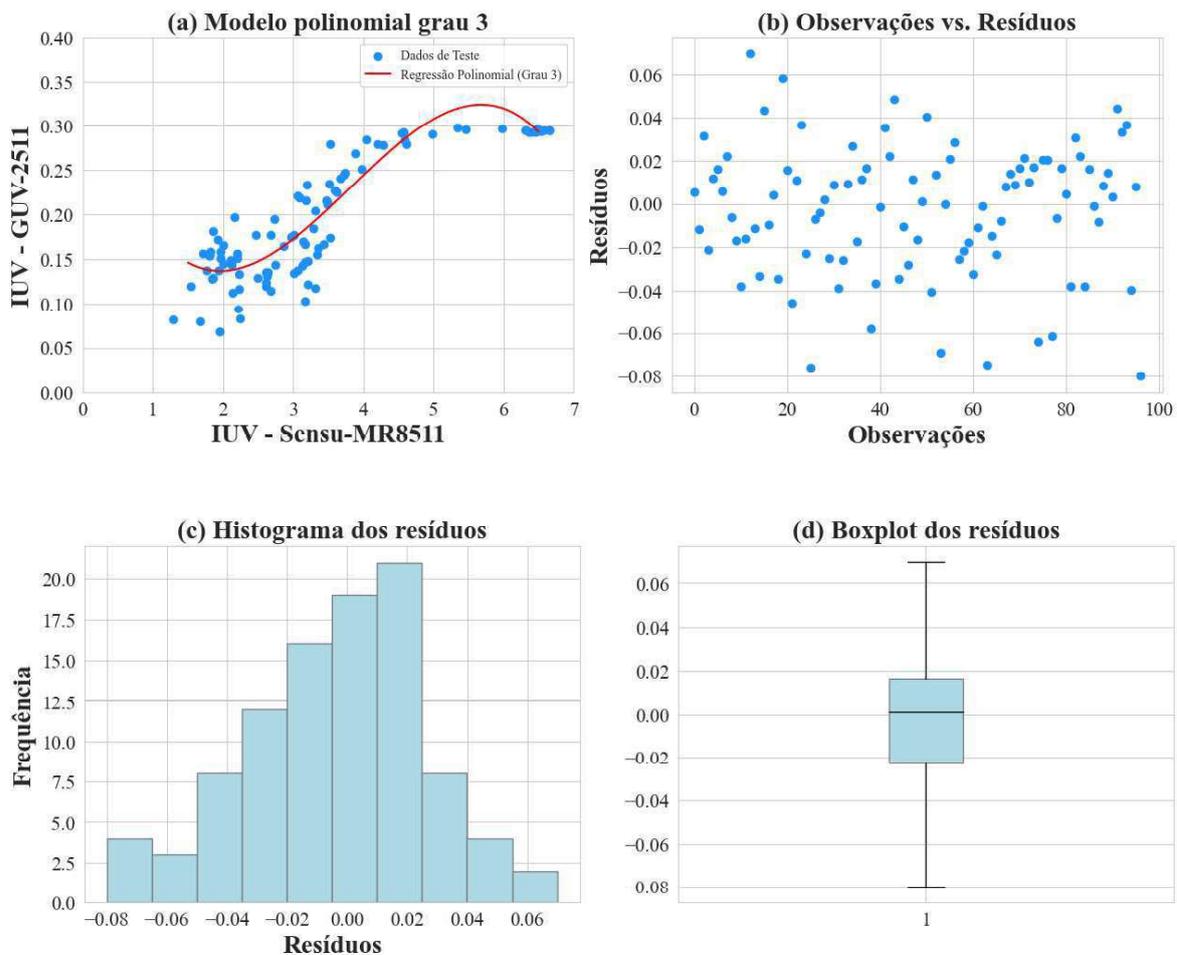


Figura 50 – Modelo polinomial grau 3, Observações vs. Resíduos, Histograma e boxplot dos resíduos – Modelo $UV_{SENSU} \times UV_{BGUV}$

Para a homogeneidade dos resíduos, o teste de Goldfeld-Quandt apresentou estatísticas de 1,06, com p-valor acima de 0,05 (0,42), sugerindo que os resíduos apresentam dados homogêneos. Além disso, o teste de Shapiro-Wilk, utilizado para verificar a normalidade dos resíduos, resultou em um p-valor de 0,1949. Esses resultados indicam que os resíduos da regressão polinomial grau 3 não violaram os pressupostos e respaldam a validade do modelo.

4.3. Caracterização de recortes urbanos com céu obstruído na cidade de João Pessoa/PB

Os recortes urbanos com obstrução do céu utilizados para o estudo foram a Praça Silvio Porto e o Parque Linear Parahyba 2, ambos localizados em áreas costeiras na cidade de João Pessoa/PB. A praça Silvio Porto está inserida em zona adensada, sobretudo por edificações residenciais multipavimentos. O entorno da praça apresenta edifícios cujas alturas máximas

ultrapassam 10 pavimentos. Esse recorte é composto por 13 lotes com gabarito⁸ abaixo de 5 pavimentos, com predominância de 2 andares; 5 lotes entre 5 e 10 pavimentos e 8 lotes acima de 10 pavimentos. Durante a coleta de dados iniciada em 2021, foi identificado apenas um vazio urbano referente à uma residência que passou por processo de demolição. Quanto aos usos, a praça contempla área permeável com arborização e equipamentos urbanos – playground e quadras esportivas (Figura 51a).

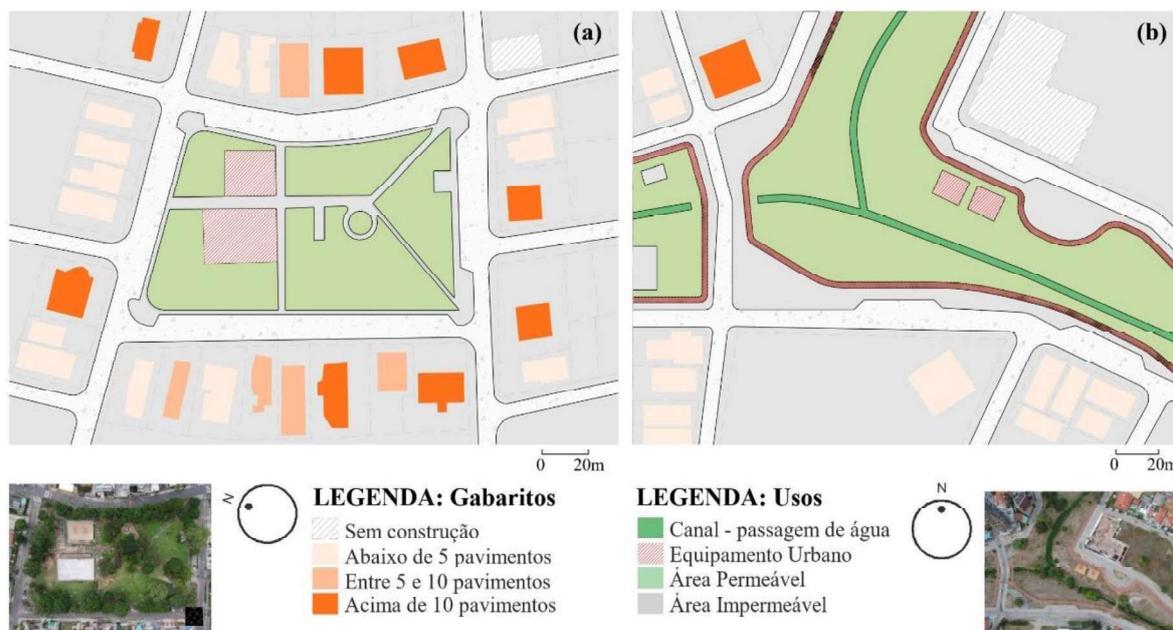


Figura 51 – Gabaritos e usos do solo na Praça Silvio Porto (a) e no Parque Linear Parahyba 2 (b)

Diferente da praça, o Parque Linear Parahyba 2 foi escolhido por apresentar menor interferência do entorno. O recorte apresenta edifícios de até 5 pavimentos, com destaque para os térreos e dois pavimentos, e apenas um edifício com gabarito acima de 10 pavimentos. Além de um vazio urbano, também identificou a presença de canal ou vala artificial destinada à passagem de água, predominância de espaços verdes e áreas permeáveis (Figura 51b).

Nos dois recortes, a escolha das estações de medição ocorreu com a seleção de diferentes espécies arbóreas caracterizadas por padrões distintos de sombreamento. A seleção abrangeu desde espécies mais densas e perene em seu ciclo de vida até as mais jovens e

⁸ É a altura máxima da edificação, calculada pela distância entre o pavimento térreo e o nível da cobertura, excluídos o ático, as casas de máquinas e a caixa d'água.

caducifólias, caracterizadas pela perda sazonal das folhagens. Adicionalmente, foram identificadas as sombras decorrentes de edifícios circunvizinhos ou de outras árvores. A Figura 52 ilustra as seis estações de medição selecionadas, sendo: (1) *Pachira Aquatica* (cient.) ou Munguba (pop.), (2) *Adenantha Pavonina* (cient.) ou Olho de Pombo/Carolina (pop.), (3) *Jacaranda mimosifolia* (cient.) ou Jacarandá Mimoso, (4) *Handroanthus heptaphyllus* (cient.) ou Ipê Rosa (pop.), (5) *Leucaena leucocephala* (cient.) ou Leucena (pop.) e (6) *Syzygium cumini* (cient.) ou Jamelão/Oliveira (pop.).

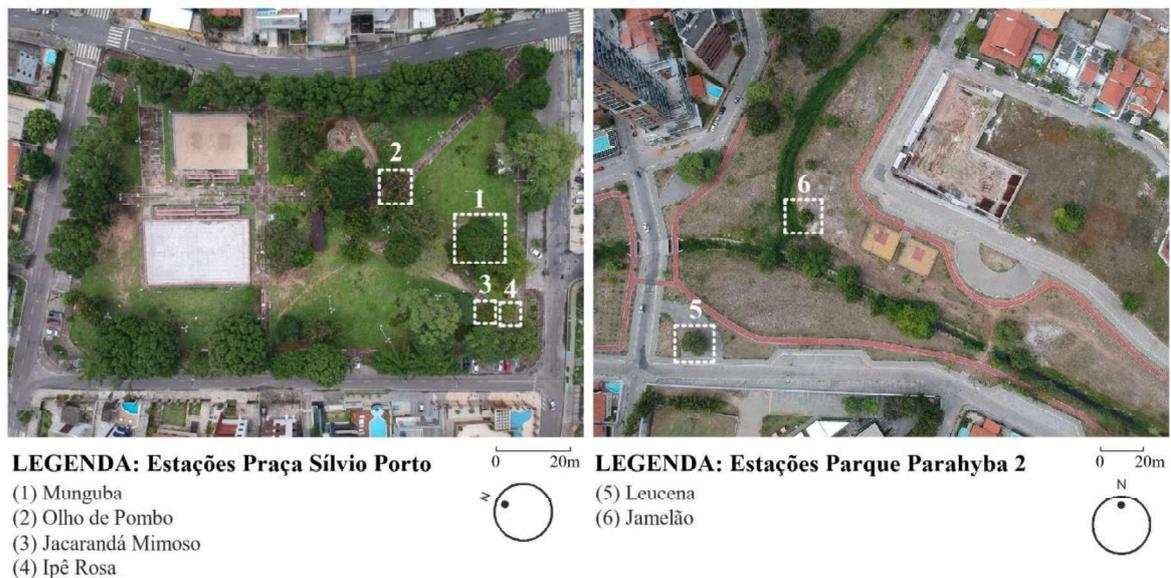


Figura 52 – Localização da área de estudo: (a) Praça Sílvio Porto, Manaíra; (b) Parque Paraíba II, Jardim Oceania. Fonte: Adaptada da imagem da autora.

A Munguba cresce sob sombra parcial ou pleno sol e pode atingir de 4 a 30 metros de altura dependendo das condições climáticas (Figura 53a). Esta árvore tem uma copa grande e densa, formato arredondado com tronco de 25 a 90 cm de diâmetro e casca espessa, lisa e cinza a acastanhada. As folhas, disponíveis o ano todo, são palmadas, compostas por 5–9 folíolos lanceolados, e agrupadas nas extremidades dos ramos, são verdes brilhantes a verde-escuras lisas com textura papirácea a coriácea (Jorge; Luzia, 2012; Rodrigues; Pastore, 2021). O Olho de Pombo ou Carolina é nativa de regiões tropicais originária da Ásia, sendo comumente empregada em reflorestamentos, arborização urbana e artesanato, além de possuir usos medicinais. Como grande parte das espécies de leguminosas, possui sementes com tegumento impermeável e duro, que oferece alta resistência ao crescimento das sementes. De porte médio a grande, é uma árvore de altura média de 7m, com uma copa ampla e aberta e folhas bipinadas com pequenos folíolos em forma de leque (Figura 53b).

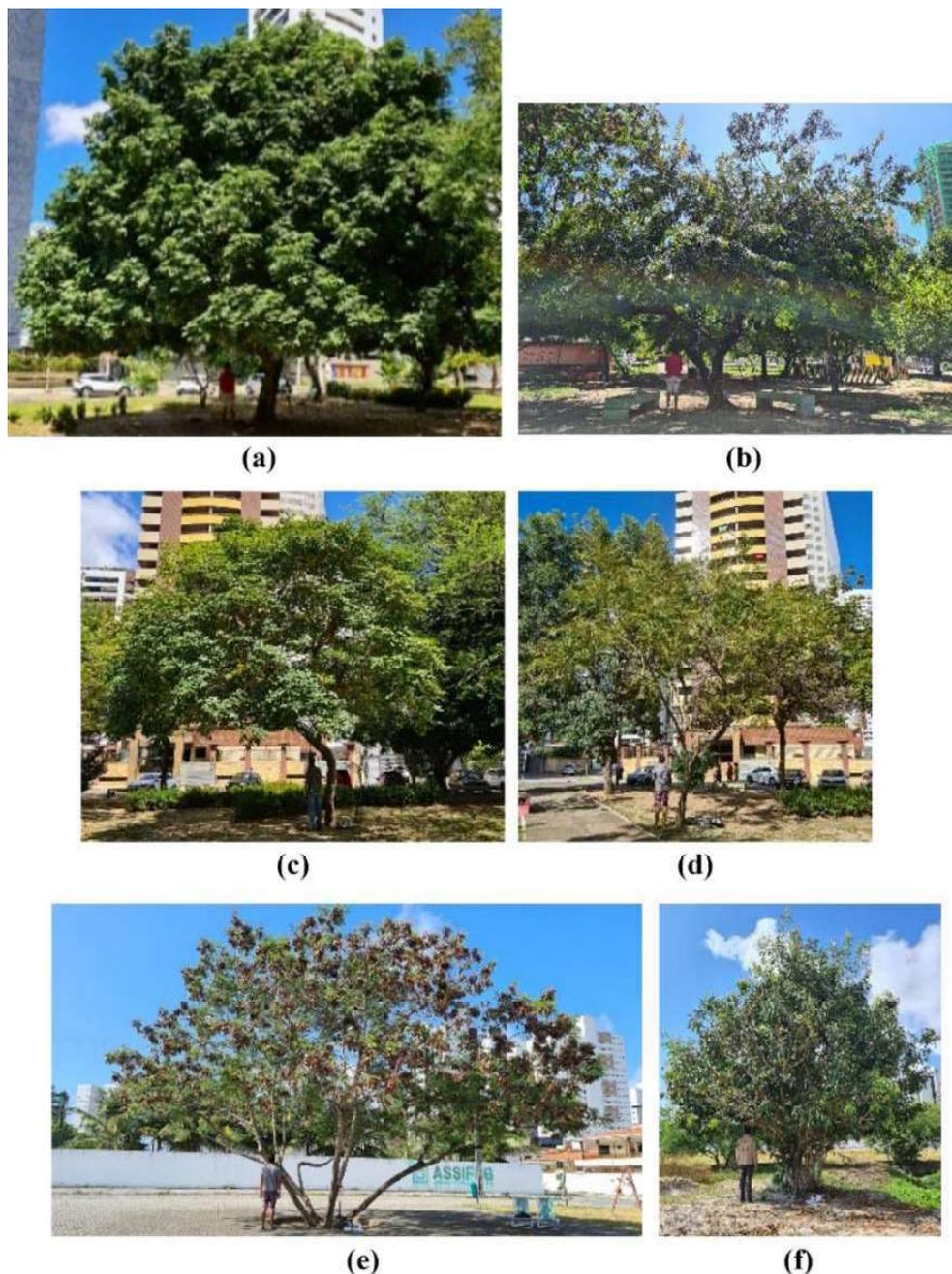


Figura 53 – Estações de medição selecionadas por espécie arbórea (a) Munguba; (b) Olho de Pombo; (c) Jacarandá Mimoso; (d) Ipê Rosa; (e) Leucena; (f) Jamelão.

O Jacarandá Mimoso mede até 15 m de altura, com casca fina e acinzentada (Figura 53c). Folhas opostas, compostas bipinadas, de 10 a 25 cm de comprimento com folíolos pequenos, glabros e de bordo serrado. Flores com coloração azulado-lilás, arranjadas em inflorescências piramidais densas. Os frutos são cápsulas lenhosas, muito duras e contendo numerosas sementes aladas. Árvores nativas dessa espécie são indicadas para ações de reflorestamento, preservação ambiental, arborização urbana e paisagismo. Já os Ipês Rosa

são caducifólios, ou seja, perdem todas as folhas que são substituídas por cachos de flores de cores intensas (Figura 53d). São árvores de grande porte que gostam de calor e sol pleno. Pode alcançar de 20 até 35 metros de altura, com tronco ereto e cilíndrico de 60 a 80 cm de diâmetro. Suas flores possuem tons de rosa e roxo, floresce de junho a agosto (Instituto Brasileiro de Florestas, 2020).

A *Leucena* é uma planta perene, semeada na primavera e de sistema radicular profundo, com poucas raízes laterais, que ocorrem em pequeno número, próximas à superfície do solo (Figura 53e). Sua altura pode variar de 5 a 20mAs folhas são bipinadas, com 15 a 20 cm de comprimento, apresentando quatro a dez pares de pinas, cada uma com cinco a vinte pares de folíolos em cada pina. Cada folíolo apresenta 7 a 15 cm de comprimento e 3 a 4 mm de largura. (Seiffert; Thiago, 1983). Já o *Jamelão* é uma árvore frutífera de grande porte que pode atingir mais de 20 metros de altura em sua fase adulta, formando uma copa densa (Figura 53f). As folhagens são simples com formato lanceolado e margem ondulada. Essa espécie apresenta grande capacidade de adaptação a diferentes tipos de solo, onde é amplamente cultivada para fins ornamentais e de sombreamento urbano. Seu fruto é uma baga elipsóide com uma única semente, apresentando maturação em janeiro e fevereiro (Vizzotto; Pereira, 2008).

As características das espécies quanto à geometria e ao ciclo de vida foram detalhadas na Tabela 15. Por meio dos registros fotográficos e de uma referência humana, foi realizado o levantamento dimensional das árvores utilizando escalonamento da imagem, redimensionando e ajustando conforme a escala real (Figura 54). As alturas totais variaram de 6,00m a 10,40m, com troncos de 1,60m a 3,15m, e as copas apresentaram diâmetros acima de 6m (entre 6,35m e 11,10m). As folhas são, em sua maioria, bipinadas opostas em ramos com folículos e os frutos envolvidos em cápsulas ou vagens.

Tabela 15 – Principais características dimensionais das árvores urbanas investigadas

Característica	Munguba (a)	Olho de Pombo (b)	Jacarandá (c)	Ipê Rosa (d)	Leucena (e)	Jamelão (f)
Altura total, m	10,40	7,35	7,25	7,60	7,70	6,00
Altura do tronco, m	2,00	1,85	3,15	2,20	2,20	1,60
Diâmetro da copa,	11,10	10,85	7,60	8,55	11,80	6,35

m						
Diâmetro do tronco, m	0,40	0,75	0,22	0,22	0,85	0,60
Ciclo de vida	Perene	Perene	Perene	Caduca	Perene	Perene
Folhas, formato e dimensão	Elíptico e palmada com 6 a 9 folículos verdes	Bipinadas opostas em ramos de 30 a 60cm com 5 a 20 pares de folículos	Bipinadas opostas com 25 a 30 pares de pequenos folículos	Distribuição oposta composta por 5 folículos 6x10cm	Bipinadas de 15 a 20cm com 4 a 10 pares com 5 a 20 pares de folículos.	Opostas elípticas de 8 a 14cm
Fruto	Falso cacau, contém paina branca que envolve as sementes	Legume verde longo e estreito com 8 a 13 sementes vermelhas	Cápsula lenhosa, muito dura com sementes	Cápsula longa e cilíndrica de 20 a 60cm com sementes	Vagens planas de 12 a 18cm com 15 a 30 sementes	De forma ovóide arroxeadado escuro com polpa carnosa

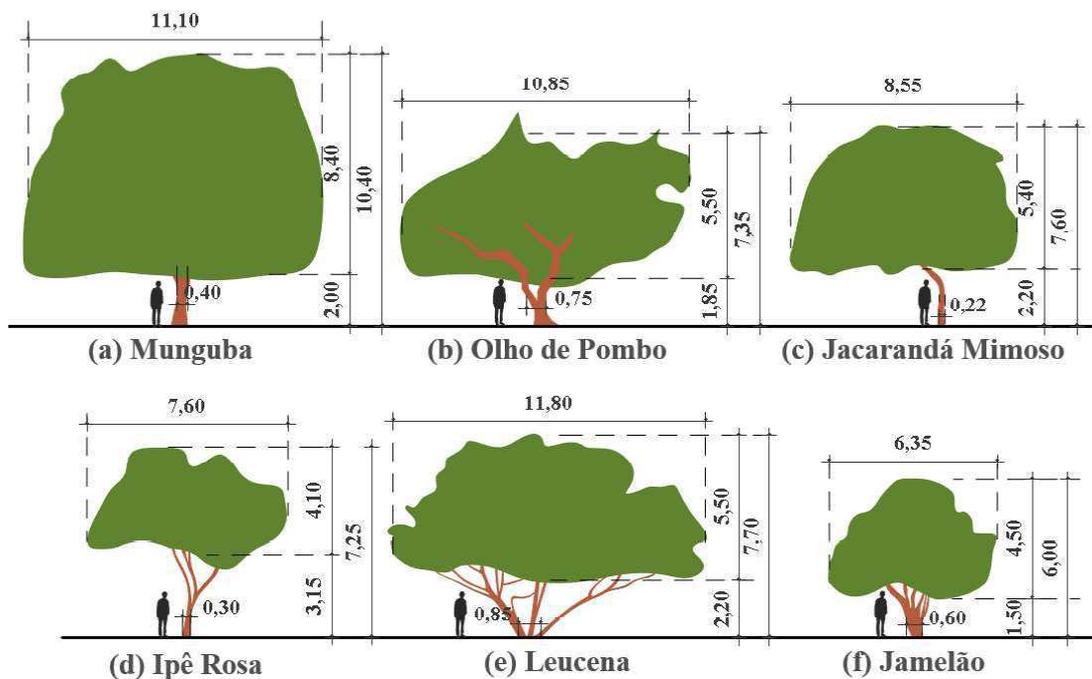


Figura 54– Esquema de levantamento dimensional das árvores: (a) Munguba; (b) Olho de Pombo; (c) Jacarandá Mimoso; (d) Ipê Rosa; (e) Leucena; (f) Jamelão.

A Tabela 16 descreve as características gerais das estações, tais como data e turno das medições de campo, condição de céu predominante e tipo de sombreamento representativo de cada estação. Na Estação Sol, vista como parâmetro referência, foram conduzidas medições simultâneas às Estações Sombra, considerando os mesmos dias e turnos (manhã e tarde). Diante da limitação do equipamento Sensu quanto à resistência a respingos e chuvas, foram consideradas apenas condições de céu claro e parcialmente encoberto.

Tabela 16– Características gerais das estações de medição

Estação	Data	Turno	Condição de céu	Tipo de sombreamento
Sol	-	-	-	Sem obstrução
Sombra: Munguba	01 de agosto de 2022	Manhã	Parcial. nublado	Apenas árvores: (em <i>cluster</i>)
	21 de setembro de 2022	Tarde	Parcial. nublado	
Sombra: Olho de pombo	19 de setembro de 2022	Manhã	Claro	Apenas árvores (em <i>cluster</i>)
	20 de setembro de 2022	Tarde	Claro	
Sombra: Jacarandá Mimoso	09 de setembro de 2022	Manhã	Parcial. nublado	Combinadas: Árvores + Edifícios
	16 de setembro de 2022	Tarde	Claro	
Sombra: Ipê Rosa	10 de agosto de 2022	Manhã	Claro	Combinadas: Árvores + Edifícios
	12 de setembro de 2022	Tarde	Claro	
Sombra: Leucena	13 de outubro de 2022	Manhã	Parcial. nublado	Isolada
	04 de janeiro de 2023	Tarde	Claro	
Sombra: Jamelão	17 de outubro de 2022	Manhã	Parcial. nublado	Isolada
	03 de novembro de 2022	Tarde	Claro	

Cada estação foi classificada pela estratégia de sombreamento identificadas por observação *in loco*, sendo denominadas por: (a) **Apenas árvores**, quando ocorre a sobreposição de árvores de várias espécies sem interferência de edifícios; (b) **Combinadas**, quando o sombreamento é gerado por árvores e elementos construídos (edifícios do entorno imediato); e (c) **Árvore isolada**, quando há apenas de uma única árvore sem bloqueio por edifícios ou outra vegetação.

4.4. Obstrução do céu e magnitude da radiação ultravioleta em áreas urbanas

Os dados gerais das Estações Sombra totalizaram 2496 ocorrências, cujas variáveis foram radiação UV (mW/cm^2) em áreas sombreadas e Fator de Céu segmentado (FCs), como variáveis dependentes (resposta), e Estações de medição, definida pela sombra da árvore, Turno e Condição de céu predominante, como variáveis independentes (explicativas). Quanto às estatísticas descritivas, observou-se pelos histogramas e boxplots ilustrados na Figura 55 que as variáveis exibiram uma distribuição assimétrica à esquerda e, assim, há uma prevalência de valores mais baixos em ambas as variáveis.

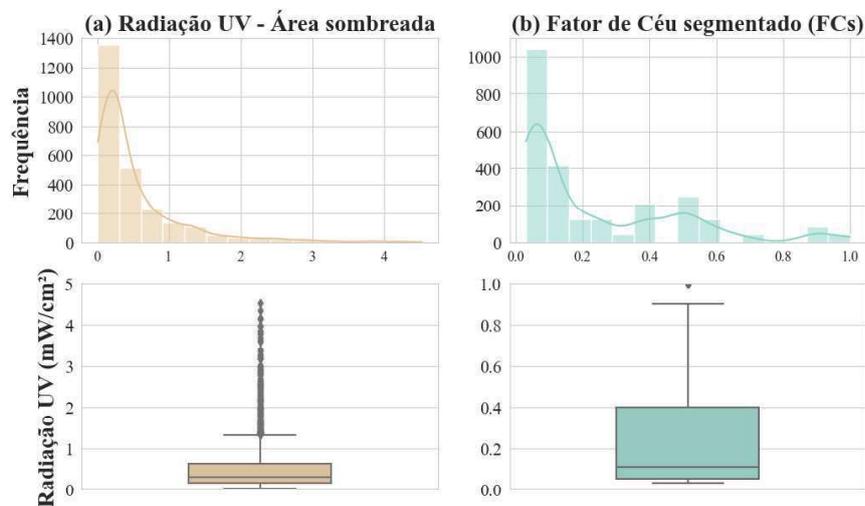


Figura 55 – Estação Sombra: Radiação UV e Fator de Céu segmentado

Foi possível identificar uma maior frequência de dados discrepantes nas medições de ultravioleta com 0,02, 4,53 e 0,52 mW/cm^2 de mínima, máxima e média, respectivamente. Quanto ao Fator de céu segmentado, a maior frequência ocorreu entre 0,03 e 0,11 com valor médio alcançando 0,24 de obstrução do céu (FCs = 0,24), desvio de 0,25 e máxima de 1,00 (Tabela 17).

Tabela 17 – Estatística descritiva dos dados de radiação UV e Fator de Céu Segmentado

Estatística	Média	Desvio Padrão	Mínimo	25%	50%	75%	Máximo
Radiação UV	0,52	0,62	0,02	0,15	0,29	0,65	4,53
FCs	0,24	0,25	0,03	0,05	0,11	0,4	1,00

Em relação ao turno de medição, pela manhã foram registrados os maiores dados de radiação UV, seguindo o mesmo comportamento quanto a fração de céu (FCs). Durante este período foram observadas mais lacunas entre as folhas e regiões de céu com maior abertura,

atingindo seu valor máximo (1,00). No período da tarde, ocorreu evento inverso. As obstruções dos edifícios levaram a redução tanto da obstrução do céu quanto da incidência de radiação UV (Figura 56). Juntamente com o ozônio e o aerosol, as nuvens são um dos compostos atmosféricos que apresentam maior influência sobre atenuação dos raios UV, sobretudo na faixa B (Bilbao; Mateos; Miguel, 2011; Miguel *et al.*, 2011). Assim, a predominância de céu aberto e a baixa concentração de nuvens possibilitaram maiores ocorrências, confirmando a ação do céu claro no aumento das incidências de radiação UV (Figura 57).

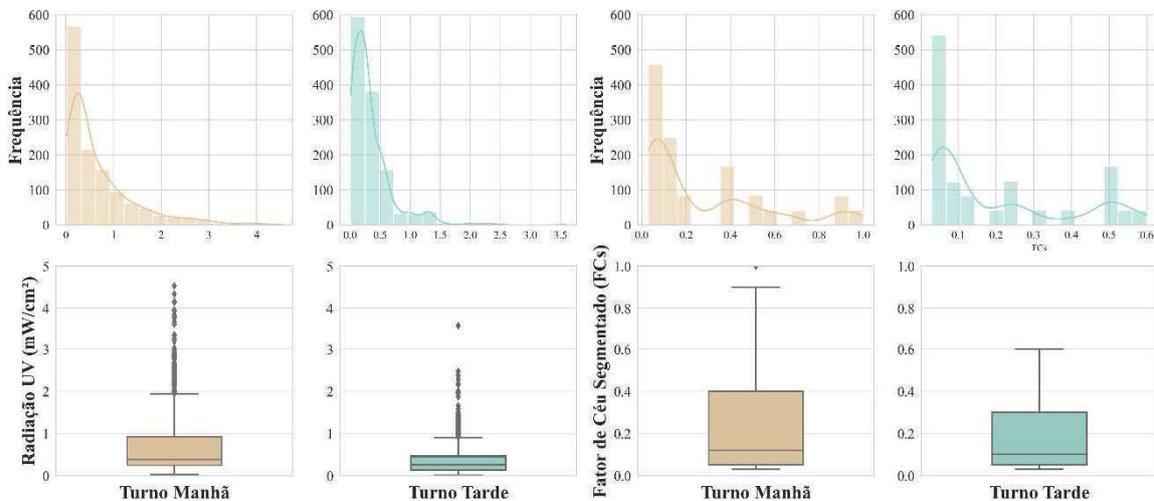


Figura 56 – Estação Sombra: Radiação UV e Fator de Céu segmentado por turno

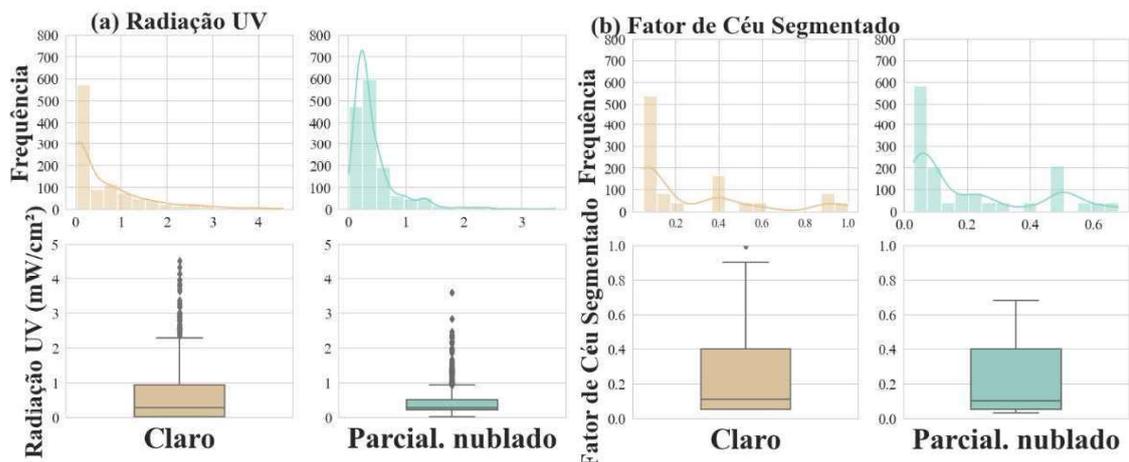


Figura 57 – Estação Sombra: (a) Radiação UV e (b) Fator de Céu segmentado por tipo de céu

Pelos boxplot, é possível visualizar o comportamento das distribuições de radiação UV nas seis estações de medição (Figura 58). Em especial, a Estação Munguba (1)

apresentou mais eventos tendendo a zero. Conforme observado nos Fatores de Céu segmentado de cada estação, percebeu-se que há uma relação entre a magnitude da radiação UV e a obstrução do céu, evidenciado na estação Jacarandá (5) e Munguba (1), como as de maior e menor incidência UV, respectivamente. Os dados espúrios presentes acima do 3º quartil foram analisados como registros, cuja abertura de copa sofreu impacto do movimento das folhas, tendo maior lacunas e, conseqüentemente, mais incidência da radiação UV direta.

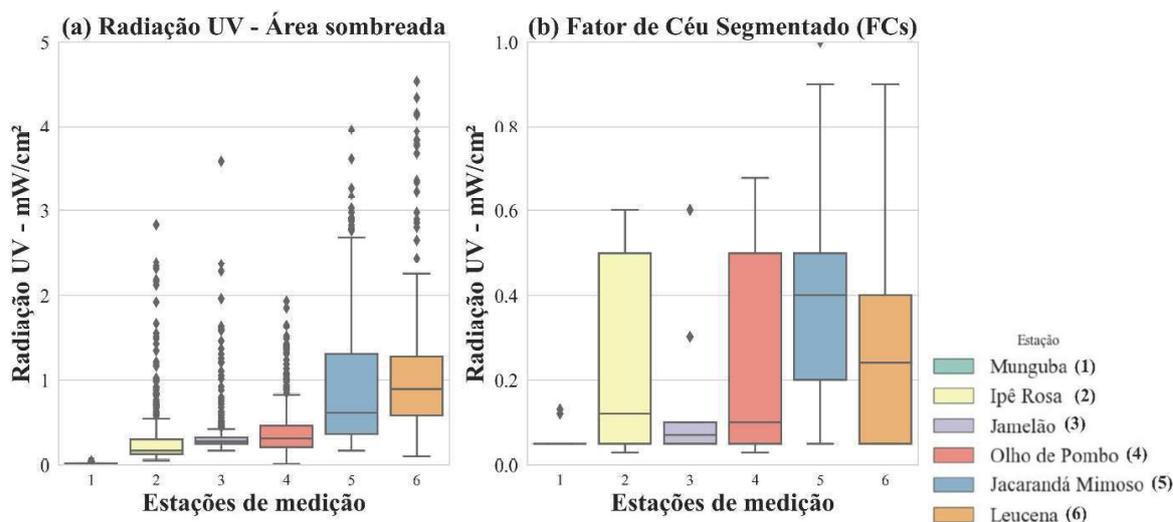


Figura 58 – Histograma e boxplot das estações – Radiação UV e Fator de Céu segmentado

Na Figura 59 são ilustradas as imagens hemisféricas das Estações Sombra e seus respectivos diagramas de fatores de céu – SVF, SCF e FCs. Observou-se uma pequena variação dos indicadores de céu, tendo SVF entre 0,05 e 0,33, SCF entre 0,02 e 0,28 e os valores de FCs médios entre 0,07 e 0,44 e medianos entre 0,05 e 0,46. É possível verificar ainda que as médias mais baixas dos FCs apresentaram similaridades com o SVF. A estação com menor fração de céu, **Munguba**, apresentou combinação de árvores de mesma espécie e de alta densidade foliar, avaliada pela concentração das folhas e os levantamentos dimensionais (altura e largura da copa e altura total da árvore). As características das estações de medição de radiação UV são apresentadas na Tabela 18.

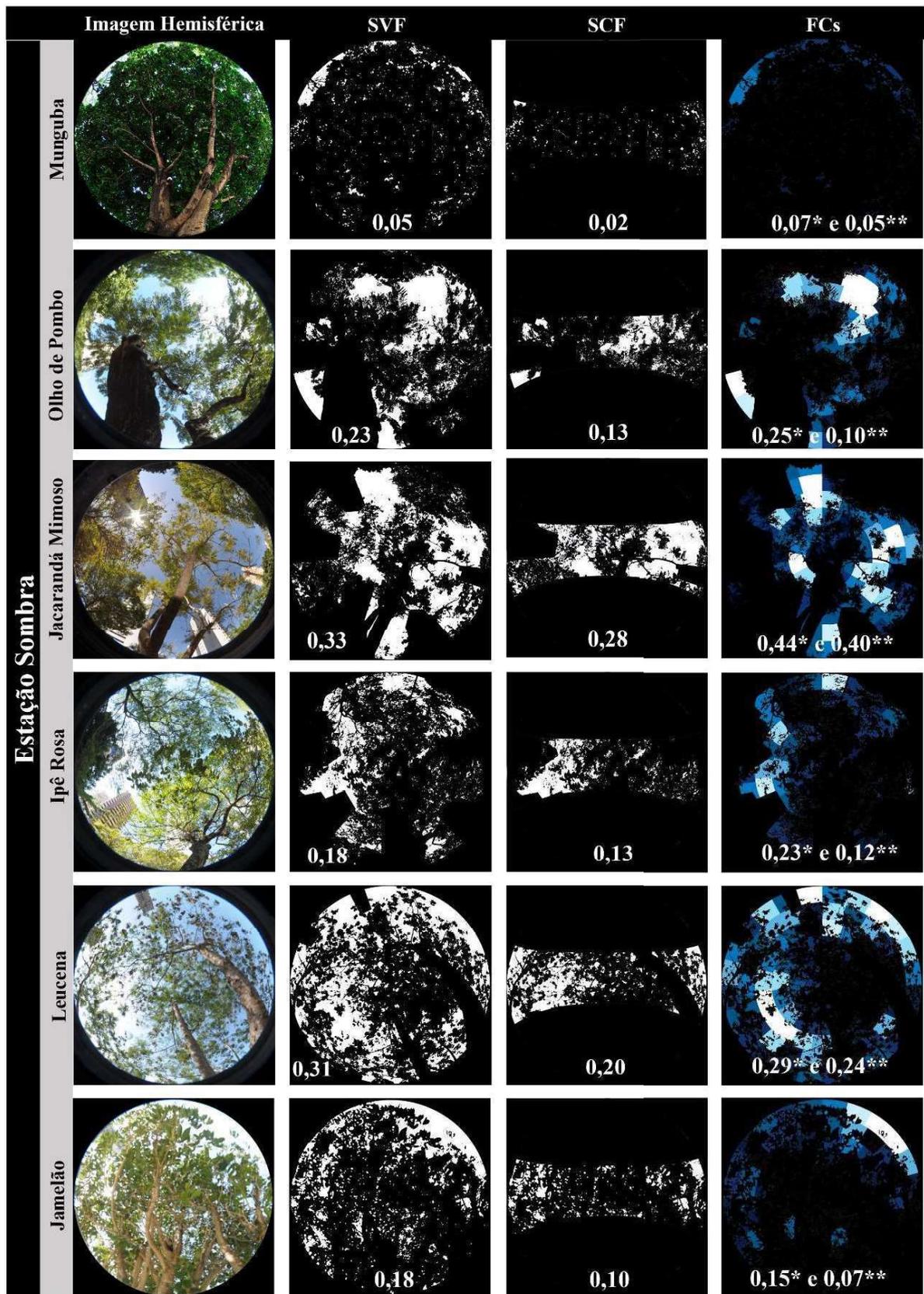


Figura 59 – Imagens hemisféricas e representações dos diagramas dos fatores de céu – Sky View Factor, Sun Coverage Factor e Fator de Céu segmentado – das Estações Sombra

Tabela 18 – Dados gerais das Estações Sombra: Turno, duração do sol e fatores de céu

Estação Sombra	Turno	Duração do sol/ turno (min)	SVF	SCF	FCs*	FCs**	Estratégias de sombreamento
Munguba	Manhã	7	0,05	0,02	0,07	0,05	Apenas árvores
	Tarde	10					
Olho de pombo	Manhã	164	0,23	0,13	0,25	0,10	Apenas árvores
	Tarde	26					
Jacarandá Mimoso	Manhã	171	0,33	0,28	0,44	0,40	Combinadas: Árvores + Edifícios
	Tarde	78					
Ipê Rosa	Manhã	7	0,18	0,13	0,23	0,12	Combinadas: Árvores + Edifícios
	Tarde	90					
Leucena	Manhã	98	0,31	0,20	0,29	0,24	Árvore Isolada
	Tarde	31					
Jamelão	Manhã	41	0,18	0,10	0,15	0,07	Árvore Isolada
	Tarde	24					

*Valores médios de fator de céu segmentado ** mediana

Em complemento a Tabela 18, a Figura 60 apresenta os diagramas de Fator de Céu segmentado por estação com sobreposição do caminho aparente do sol referente ao dia de medição. Mesmo com a presença de elementos construídos, a porção de céu visível foi maior na estação **Jacarandá**, com destaque para FCs que atingiu 0,44. As obstruções causaram maior impacto nas áreas fora do alcance solar (zonas mais à Norte e à Sul) e próximo ao meio-dia solar. Estas áreas são comumente comprometidas pelas dimensões do tronco e pela região central da copa, se assemelhando ao bloqueio dos edifícios de entorno no início e fim do dia. Ainda, o tempo de incidência solar foi inferior na estação de menor SVF, SCF e FCs.

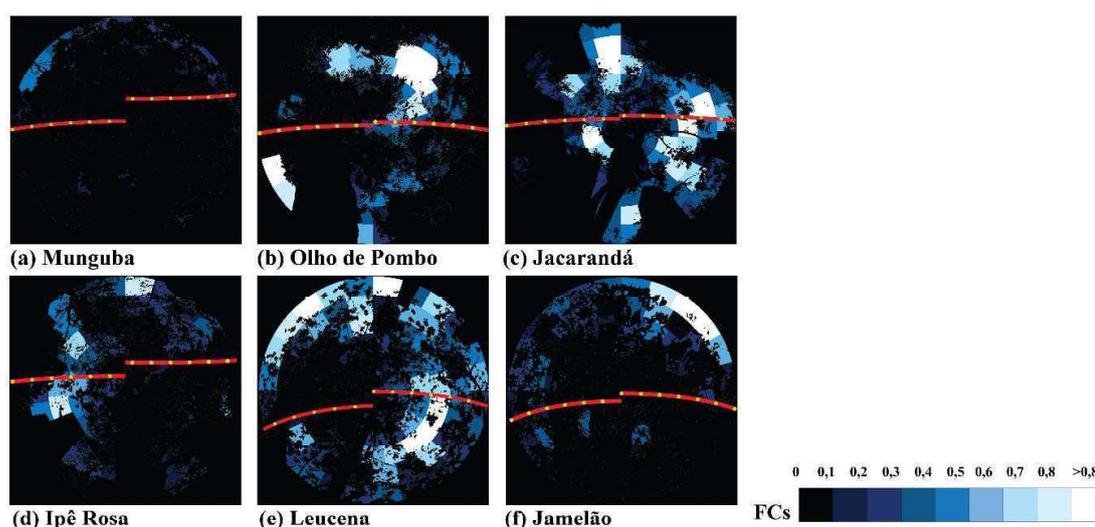


Figura 60 – Diagramas de Fator de Céu segmentado com caminho do sol no dia de medição

Apesar do **Ipê Rosa** ser uma árvore caducifólia, cujo ciclo de vida é caracterizado pela perda das folhas no período entre inverno e primavera, as obstruções dos edifícios foram mais significativas na redução da visibilidade de céu do que a morfologia da árvore. No entanto, observou-se que o turno da manhã é mais obstruído, sendo favorável para diminuição da incidência de radiação UV. Já na Estação **Olho de Pombo**, o tronco da árvore interferiu na visibilidade de céu tal qual um edifício ou uma copa densa. As estações **Leucena** e **Jamelão** tiveram pouca ou nenhuma interferência de obstruções de árvores e edifícios, sendo analisadas pelo efeito exclusivo de uma única espécie (isolada). Como o **Jamelão** é ainda uma árvore jovem comparada a Leucena, identificou-se que a obstrução de céu foi menos expressiva, tendo redução na visibilidade de céu no turno da manhã. Ambas perenes, a geometria das folhas pode ter interferido nas diferenças entre os FCs.

Foi aplicado o teste de normalidade (Lilliefors) e para todas as estações os dados de radiação UV não apresentaram distribuição normal (p-valor < 0,05). Também foram identificadas que não havia igualdade de variância quando aplicado o teste de Levene. Como os pressupostos de normalidade e homoscedasticidade foram violados, utilizou-se teste não-paramétrico, o Kruskal-Wallis e post-hoc de Dunn com a correção de Bonferroni, para comparação múltipla entre as Estações Sombra. A Tabela 19 apresenta os resultados dos testes.

Tabela 19 – Resultado do teste de Dunn-Bonferroni com valor p ajustado por estação

Grupo 1	Grupo 2	Estatística	P-Valor	P-Valor ajustado
Ipê Rosa	Jacarandá	17,0525	3,345e-65	5,018e-64
	Jamelão	5,3603	8,306e-08	1,245e-06
	Leucena	21,5710	3,363e-103	5,045e-102
	Munguba	-14,7533	2,926e-49	4,389e-48
	Olho de pombo	7,3373	2,177e-13	3,266e-12
Jacarandá	Jamelão	-11,6922	1,396e-31	2,0953e-30
	Leucena	4,5184	6,229e-06	9,344e-05
	Munguba	-31,805	5,357e-222	8,0361e-221
	Olho de pombo	-9,7151	2,5983e-22	3,8975e-21
Jamelão	Leucena	16,210	4,2396e-59	6,359e-58
	Munguba	-20,113	5,5960e-90	8,394e-89
	Olho de pombo	1,9770	4,803e-2	7,0252e-01
Leucena	Munguba	-36,3224	6,6692e-289	1,00e-287
	Olho de pombo	-14,2336	5,668e-46	8,502e-45
Munguba	Olho de pombo	22,0907	3,876e-108	5,8144e-107

O resultado do teste identificou as duas estações que apresentaram dados de radiação UV com semelhanças de distribuição ou de mediana e mostrou que as demais diferem, rejeitando a hipótese nula (H_0) de igualdade. O teste de post-hoc de Dunn com ajuste do valor p esclareceu ainda mais estas diferenças, sugerindo que radiação UV, representada pelas medianas, se distingue entre os padrões de sombreamento das estações. Apenas as estações **Jamelão** e **Olho de Pombo** obtiveram a estatística de teste significativa e p-valor acima do nível de significância ($1,9770$ e p-valor ajustado = $0,7205 > 0,05$).

A Figura 61 ilustra as distribuições em boxplot de cada estação de medição de radiação UV por turno (manhã e tarde). Observou-se que nenhum turno apresenta distribuição gaussiana (normal), seguindo um padrão de desvio para a esquerda. As medianas variaram de 0 a $1,2$ mW/cm^2 e dados discrepantes em seu valor máximo ultrapassaram 4 mW/cm^2 . Possivelmente, estes valores atípicos provêm de medições que ocorreram sob influência da radiação direta, muito presente em espécies com folhas pequenas (fóliculos) e copas pouco densas, como o caso do Ipê Rosa, Jamelão, Olho de Pombo e Leucena, as quais obtiveram discrepâncias em ambos os turnos.

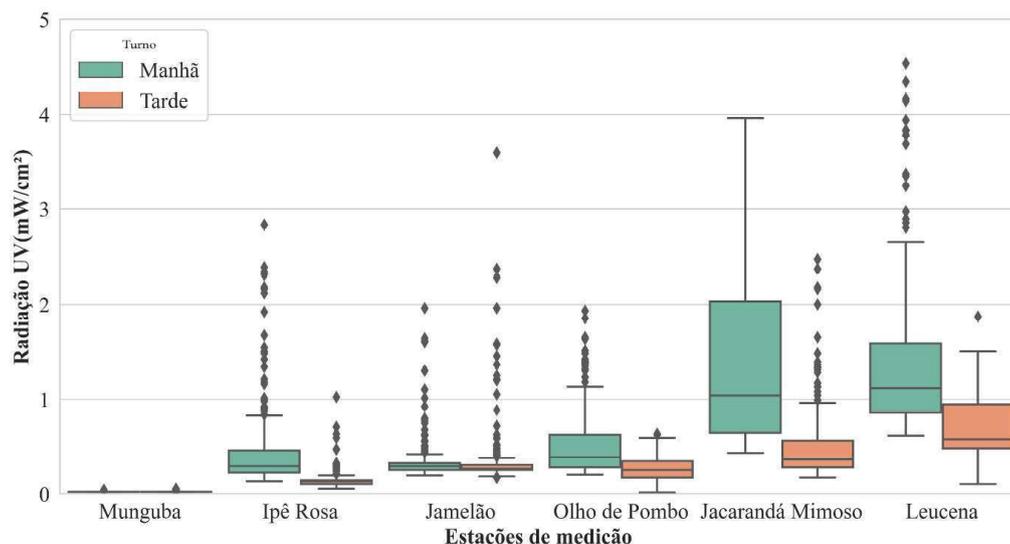


Figura 61 – Distribuição dos dados de radiação UV por turno.

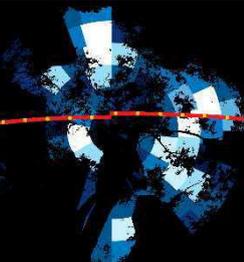
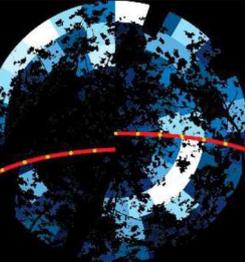
Poucas diferenças nos turnos foram identificadas entre o intervalo interquartil (do 1º ao 3º quartil) na estação Jamelão, por interferência das incidências diretas. Apenas a Jacarandá, no turno da manhã, não apresentou ocorrências de outliers. Para análise de turnos, foi aplicado o mesmo teste não-paramétrico de comparação múltipla (Kruskal Wallis e correção de Dunn Bonferroni). Pela manhã (das 7h às 11h59 – hora solar), as diferenças entre as radiações UV foram verificadas em algumas estações, sendo elas: **Ipê x Jamelão**

(SVF = 0,18 em ambas; SCF = 0,13 e 0,10; e FCs_{mediana} = 0,12 e 0,07) com estatística de teste de -0,81938 e Jacarandá x Leucena (SVF = 0,33 e 0,31; SCF = 0,28 e 0,20; e FCs_{mediana} = 0,40 e 0,24), ambas com p-valor ajustado de 1 (>0,05), conforme Tabelas 20 e 21. Observaram-se algumas similaridades entre os fatores de céu e a igualdade estatística das estações, sendo possíveis indicadores para análise de incidência de radiação UV.

Tabela 20 – Resultado do teste de Dunn-Bonferroni com valor p ajustado no turno da manhã

Grupo 1	Grupo 2	Estatística	P-Valor	P-Valor ajustado
Ipê Rosa	Jacarandá	12,737	3,635e-37	5,5439e-36
	Jamelão	-0,8193	4,1256e-1	1
	Leucena	13,680	1,3199e-42	1,979e-41
	Munguba	-11,931	8,110e-33	1,2165e-31
	Olho de pombo	3,2351	1,2158e-03	1,8237e-02
Jacarandá	Jamelão	-13,557	7,1643e-42	1,0746e-40
	Leucena	0,9429	3,457e-01	1
	Munguba	-24,669	2,2735e-134	3,410e-133
	Olho de pombo	-9,5028	2,0420e-21	3,063e-20
Jamelão	Leucena	14,5028	1,2059e-47	1,8088e-46
	Munguba	-11,112	1,0953e-28	1,6430e-27
	Olho de pombo	4,0545	5,0235e-05	7,535e-04
Leucena	Munguba	-25,612	1,109e-144	1,6637e-143
	Olho de pombo	-10,445	1,531e-25	2,297e-24
Munguba	Olho de pombo	15,166	5,8811e-52	8,821e-51

Tabela 21 – Comparativo entre os fatores de visão (SVF e SF) turno manhã

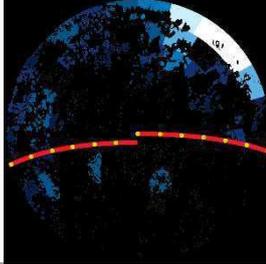
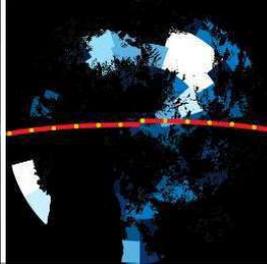
Sky View Factor (SVF)	Fator de céu segmentado (FCs)	Sky View Factor (SVF)	Fator de céu segmentado (FCs)
			
<p>IPÊ ROSA SVF = 0,18; SCF = 0,13; FCs = 0,12</p>		<p>JAMELÃO SVF = 0,18; SCF = 0,10; FCs = 0,07</p>	
			
<p>JACARANDÁ SVF = 0,33; SCF = 0,28; FCs = 0,40</p>		<p>LEUCENA SVF = 0,31; SCF = 0,20; FCs = 0,24</p>	

No turno da tarde (das 12h às 17h – hora solar) apenas os resultados do teste de comparação entre as estações **Jamelão** (SVF = 0,18; SCF = 0,10; FCs_{mediana} = 0,07) e **Olho de Pombo** (SVF = 0,23; SCF = 0,13; FCs_{mediana} = 0,10) foram estatisticamente significativos. Para as combinações, o p-valor ajustado foi 1, ou seja, maior que o nível de significância de 0,05, comprovando a hipótese nula (Ho) de que não há diferenças entre as distribuições de radiações UV das estações. Apesar de apresentar fator de visão similares em ambos os turnos, a cobertura solar (SCF) e o Fator de Céu segmentado (FCs) foram mais relevantes no turno da tarde (Tabelas 22 e 23).

Tabela 22 – Resultado do teste de Dunn-Bonferroni com valor p ajustado no turno da tarde

Grupo 1	Grupo 2	Estatística	P-Valor	P-Valor ajustado
Ipê Rosa	Jacarandá	13,954	2,9596e-44	4,439e-43
	Jamelão	9,9040	3,996e-23	5,995e-22
	Leucena	19,3105	4,3767e-83	6,565e-82
	Munguba	-7,3436	2,0777e-13	3,1166e-12
	Olho de pombo	8,5176	1,6285e-17	2,442e-16
Jacarandá	Jamelão	-4,0502	5,1155e-05	7,6733e-04
	Leucena	5,3562	8,498e-08	1,2747e-06
	Munguba	-21,298	1,1834e-100	1,775e-99
	Olho de pombo	-5,4367	5,426e-08	8,14013e-07
Jamelão	Leucena	9,4065	5,1291e-21	7,6937e-20
	Munguba	-17,2477	1,1631e-66	1,744e-65
	Olho de pombo	-1,3864	1,6561e-01	1
Leucena	Munguba	-26,654	1,5969e-156	2,3954e-155
	Olho de pombo	-10,792	3,7167e-27	5,5705e-26
Munguba	Olho de pombo	15,8612	1,1739e-56	1,7609e-55

Tabela 23 – Comparativo entre os fatores de visão (SVF e SF) turno manhã

Sky View Factor (SVF)	Fator de céu segmentado (FCs)	Sky View Factor (SVF)	Fator de céu segmentado (FCs)
			
JAMELÃO		OLHO DE POMBO	

A sombra da copa das árvores durante o meio-dia solar foi mais propensa a lacunas do que em outros horários. As estratégias de sombreamento não foram indicativas para semelhança entre as radiações UV, uma vez que a sombra proveniente das estações com

árvores isoladas, com árvores e edifícios ou com a combinação de árvores, em algumas situações, obteve comportamentos iguais.

Concomitante às Estações Sombra, medições de radiação ultravioleta foram conduzidas em dois locais de pouca interferência do entorno, as **Estações Sol**. Estas estações representaram os quatro primeiros dias de coleta que ocorreram na Praça Sílvio Porto, enquanto os dois últimos foram no Parque Parahyba II. Os dados gerais das Estações Sol também totalizaram 2496 ocorrências, tendo como variável dependente (resposta) a radiação UV (mW/cm^2) e como variáveis independentes (explicativas) os dias de medição, turno e condição de céu predominante. A estatística descritiva dos dados para os seis dias revelou que a maioria não segue distribuição normal nem exibe simetria (Figura 62). Os registros do primeiro dia, visualizadas no boxplot 1, mostram uma distribuição relativamente simétrica, com uma mediana centralizada, indicando uma variabilidade moderada mais próxima da normalidade. Nos dias subsequentes, as distribuições apresentaram assimetrias positivas (dias 2, 5 e 6) e negativas (dias 3 e 4), sem ocorrência de dados espúrios (*outliers*) em nenhum dos dias.

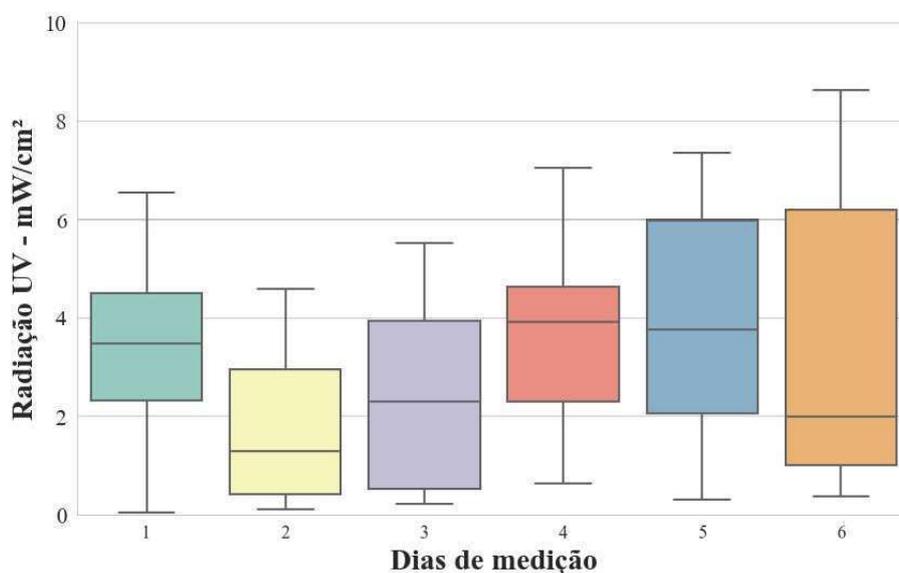


Figura 62 – Distribuição dos dados de radiação UV por dia de medição

As medições apresentaram radiação UV máxima entre 4 e $8\text{mW}/\text{cm}^2$, enquanto as mínimas tenderam a zero e as medianas entre 1 e $4\text{mW}/\text{cm}^2$. No entanto, os registros referentes ao segundo dia de medição obtiveram leituras notadamente inferiores em comparação aos demais. Neste dia, a mínima, mediana e máxima registradas nos dados foram de 0,2, 1,0 e 5

mW/cm², respectivamente. Essa disparidade pode ser identificada ao avaliar a distribuição dos dados por turno e condição de céu predominante.

O comportamento da radiação UV pela manhã e tarde, assim como em condições de céu predominantemente claro e parcialmente nublado foram representadas na Figura 63. O turno da manhã se destacou ao registrar maiores incidência de UV, com exceção do quarto dia de medição. Contrariamente no turno da tarde, os dias 2, 3 e 6 apresentaram os menores registros e uma maior variabilidade dos dados, evidenciada pela presença de dados discrepantes. A prevalência do céu parcialmente nublado no turno da tarde para estes dias de medição pode ter contribuído para a redução e variação dos dados, destacando a sensibilidade da radiação UV em presença de nuvens (BILBAO; MATEOS; MIGUEL, 2011; TIBA; LEAL, 2017).

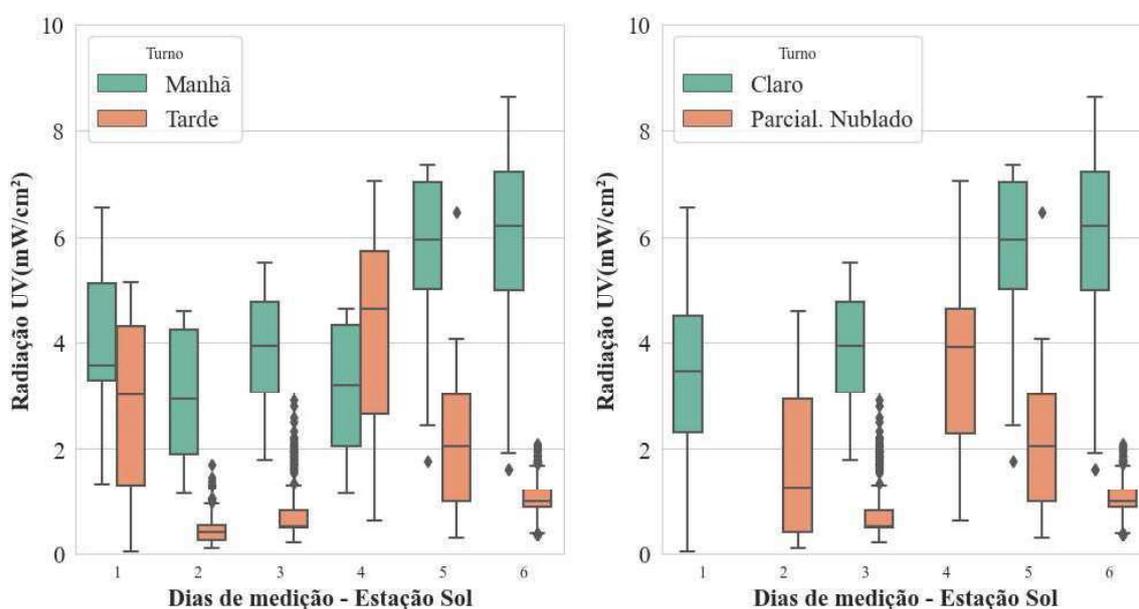


Figura 63 – Estação Sol: Distribuição dos dados de radiação UV por turno e por condição de céu predominante

Na Figura 64, são ilustradas as imagens hemisféricas das Estações Sol e seus respectivos diagramas de fatores de céu – SVF, SCF e FCs. A baixa obstrução do entorno é confirmada com os resultados da obstrução do céu para os dois recortes. Os *Sky View Fator* (SVF) registraram 0,94 e 0,98, enquanto os *Sun Coverage Factor* (SCF) foram 0,89 e 1,00. Diferente destes, os Fatores de Céu segmentado (FCs), que subdividem a abóbada em frações céu, atingiram médias de 0,86 e 0,97 e medianas de 0,91 e 0,99.

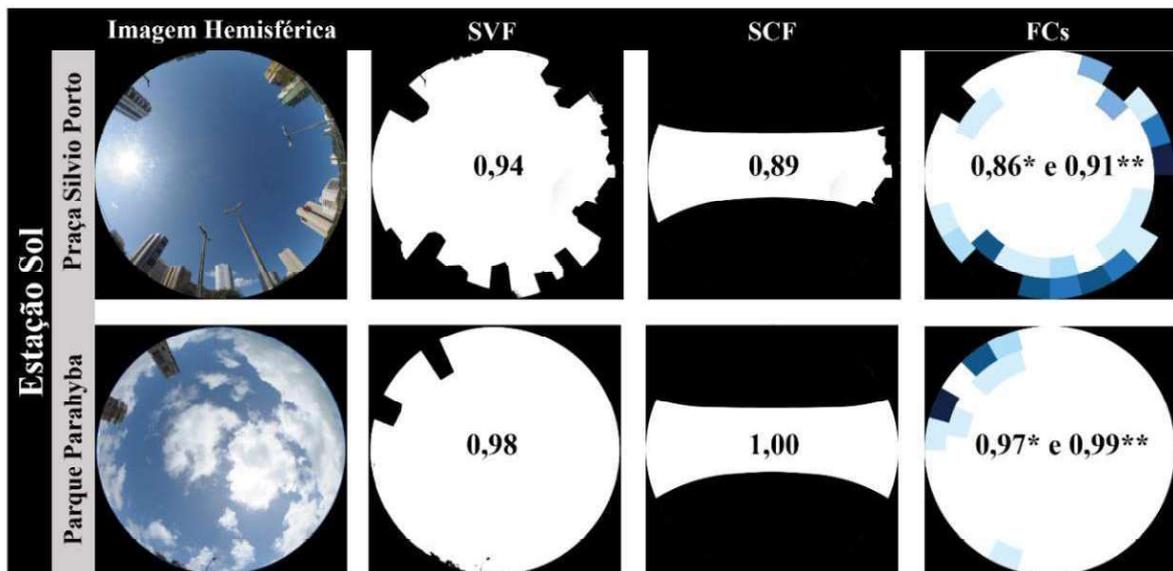


Figura 64 – Imagens hemisféricas e diagramas dos fatores de céu – Sky View Factor, Sun Coverage Factor e Fator de Céu segmentado – das Estações Sol.

A Figura 65 ilustra o comportamento entre a estratégia de sombreamento em relação à cada estação de medição. O efeito das sombras de árvores tem implicações na redução da radiação solar, funcionando como filtro natural de proteção contra efeitos nocivos dos raios UV (Grant; Heisler; Gao, 2002; Na *et al.*, 2014). Neste sentido, a interferência das sombras urbanas, decorrente das obstruções das árvores e de edifícios, foi avaliada por meio do fator de atenuação a partir do quociente entre a radiação solar UV incidente, em mW/m^2 , nas estações instaladas sob a copas das árvores (Estações Sombra) e na estação com maior área desobstruída (Estação Sol).

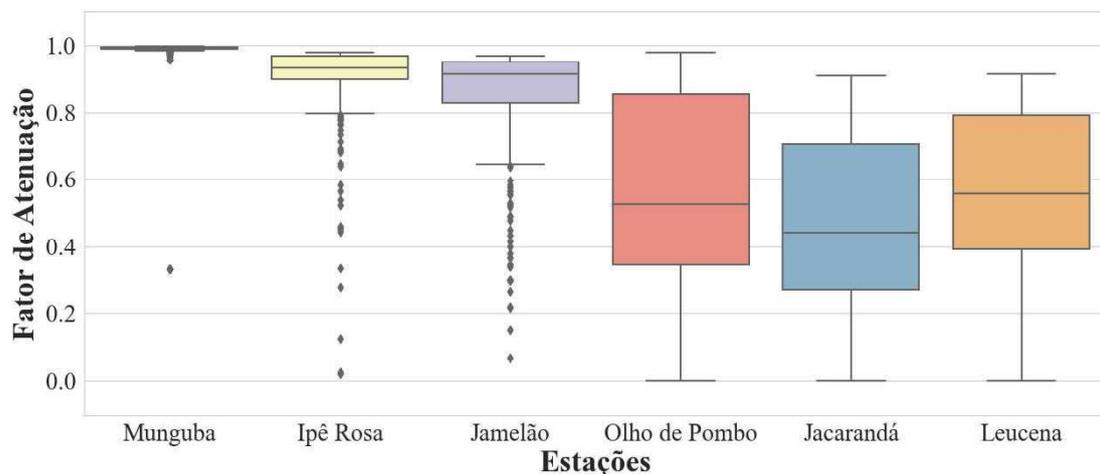


Figura 65 – Fator de atenuação da radiação UV medida na Estação sol em comparação com as demais estações (sombra)

Analisando as medianas nas estatísticas descritivas (Tabela 24), a Estação Munguba exibiu um fator de atenuação significativamente menor, contribuindo apenas com 2,1% da radiação UV incidente e tendo 98% de atenuação em comparação com estação desobstruída. Já as Estações Ipê Rosa e Jamelão demonstraram uma maior variabilidade nos dados, com maior concentração de dados espúrios abaixo de 0,80, alcançando atenuação de 91% e 84%, respectivamente.

Tabela 24 – Contribuição e fator de atenuação da radiação UV nas Estações Sombra e Sol

Estações Sombra / Sol	Contribuição da radiação UV	Fator de Atenuação	FCs
Munguba	0,02	0,98	0,07
Ipê Rosa	0,09	0,91	0,23
Jamelão	0,16	0,84	0,29
Olho de Pombo	0,48	0,52	0,25
Leucena	0,44	0,56	0,15
Jacarandá Mimoso	0,56	0,44	0,44

Vale ressaltar que a densidade das árvores, juntamente com as flutuações nas condições de céu, pode ter desempenhado um papel crucial nessas discrepâncias. Notavelmente, as Estações Olho de Pombo (FCs=0,25), Leucena (FCs=0,15) e Jacarandá (FCs=0,44) apresentaram as maiores variações de radiação UV no sombreamento e no sol, registrando contribuições de 0,48, 0,44 e 0,56 e fatores de atenuação de 52%, 56% e 44%, respectivamente. Diante deste resultado, a proteção contra radiação UV nestas estações foram as menos eficazes, especialmente na Estação Jacarandá, com quase 60% de incrementos da radiação UV, que também se sobressai com menor obstrução do céu pelo Fator de Céu segmentado, atingindo 0,44, o que possivelmente acarretou o aumento na incidência de raios ultravioletas.

4.5. Predição de síntese de vitamina D no meio urbano: Estudo em áreas sombreadas e desobstruídas

Para predição de síntese de vitamina D no meio urbano, foram desenvolvidos dois modelos logísticos, sendo o primeiro voltado para o índice UV em áreas não sombreadas e desobstruídas (**Modelo 1**), enquanto o segundo abrangeu áreas obstruídas com distintos padrões de sombreamento (**Modelo 2**). A pesquisa buscou compreender como a previsão da síntese de vitamina D pode ser influenciada por diferentes faixas horárias, padrões de sombreamento (com e sem obstrução urbana) e as condições e disponibilidade do céu. No modelo logístico, a variável preditora (Status de vitamina D) foi transformada em uma variável binária, atribuindo o valor 1 para a classificação "Sintetiza" e 0 para "Não Sintetiza" (Tabela 25).

Tabela 25 – Variáveis dos modelos logísticos

Variável resposta (Y)	Variáveis explicativas ou preditoras (X)		
IUV < 3 Não sintetiza a vitamina D (0)	Padrão Horário A	Início da manhã e final da tarde (0) Próximo ao meio-dia solar (1)	Binária
	Padrão Horário B	A cada 3h	Categórica
	Padrão Horário C	A cada 2h	Categórica
	Padrão Horário D	A cada 1h	Categórica
IUV ≥ 3 Sintetiza a vitamina D (1)	Condição de céu	Parcialmente Nublado (0) Claro (1)	Binária
	Disponibilidade de céu visível (FCs)	FCs > 0,20 (0) 0,20 ≤ FCs < 0,50 (1) FCs ≥ 0,50 (2)	Categórica
	Estratégia de sombreamento	Abertas – sem obstrução (0) Apenas árvores (1) Árvores e edifícios (2) Árvore isolada (3)	Categórica

No Modelo 1, aplicado às áreas desobstruídas, a variável resposta (Y) foi definida como a ocorrência de síntese de vitamina D e juntamente com as variáveis explicativas (X) foram codificadas de forma binária. A codificação incluiu o padrão horário A, em que o intervalo das 7h às 10h e das 15h às 17h foi categorizado como 0, e o intervalo das 10h às 15h foi categorizado como 1. Além disso, a condição predominante do céu durante o período de medição foi classificada como (0) parcialmente nublado e (1) aberto/claro. A amostra do Modelo 1, definida pelos espaços urbanos sem obstrução, apresentou a maior incidência de radiação UV, com quase 80% das observações indicando ocorrências para síntese de vitamina D (IUV ≥ 3 em 76%). A condição do

céu para ambas as categorias de estações não revelou muitas diferenças, com 58% das observações para céu claro e 42% para céu parcialmente nublado (Figura 66). Na previsão para áreas sombreadas (**Modelo 2**), novas faixas horárias foram incorporadas às variáveis explicativas (X), além das faixas presentes no Modelo 1. Essas novas faixas incluem o Padrão B a cada 3 horas, o Padrão C a cada 2 horas e o Padrão D a cada 1 hora. Adicionalmente, foram incluídas a disponibilidade de céu, com base no Fator de Céu segmentado (FCs) horário, e a estratégia de sombreamento definida pelas obstruções, que pode ser: (a) apenas árvores; (b) árvores e edifícios; (c) árvore isolada (Tabela 25).

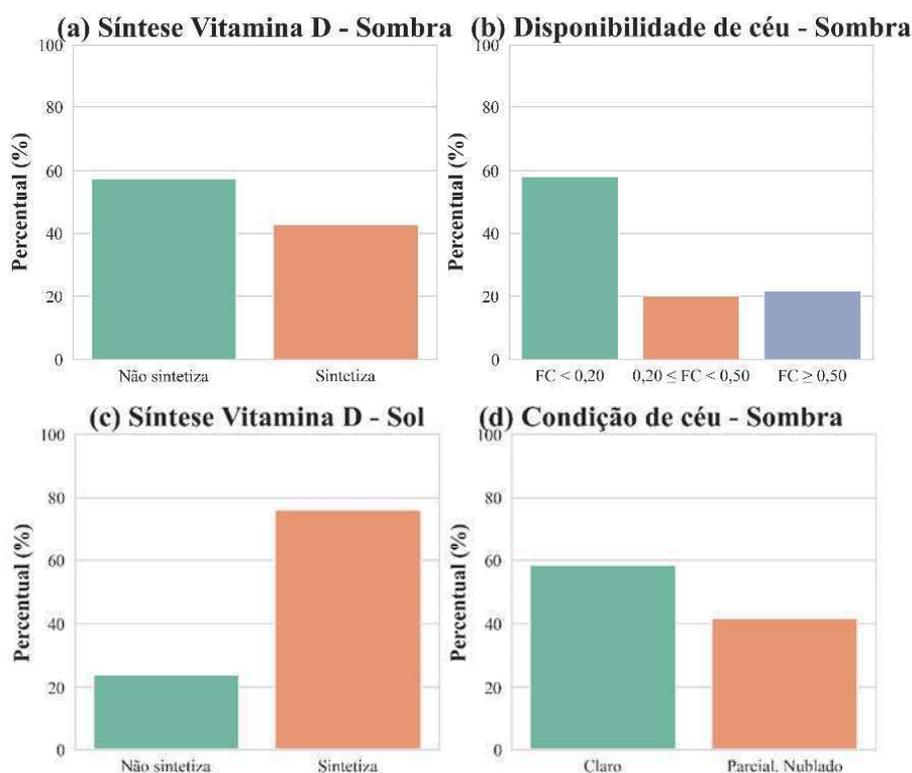


Figura 66 – Percentagem observada para estações sombreadas (a) Síntese D e (b) Disponibilidade de céu, e estações sem obstrução (c) Síntese D e (d) Condição de céu para ambas

Quanto à suposição de ausência de multicolinearidade, não foi necessário verificar possíveis correlações entre variáveis, uma vez que são classificadas como categóricas binárias ou *dummy*. Na análise descritiva dos dados, as estações sombreadas, definidas para a investigação do Modelo 2, apresentaram mais frequências para não ocorrer a síntese de vitamina D (57%). A disponibilidade de céu, determinada pelo Fator de Céu Segmentado (FCs), revelou uma frequência mais elevada para frações abaixo de 0,20 (58%). Entre 0,20 e 0,50 e acima de 0,50, as ocorrências se equipararam em 21%

4.5.1. Regressão logística para predição de síntese de vitamina D em áreas abertas (Estações Sol): Modelo 1

Para verificar a predição de síntese de vitamina D em áreas menos obstruídas, foi realizado um modelo logístico utilizando medições de radiação UV convertidas em Índice Ultravioleta, e posteriormente, codificadas de forma binária (Não sintetiza: 0; Sintetiza: 1). Dado que as variáveis independentes são *dummy*, os grupos de referência com classificação mais baixa, como Padrão A [T.1] e Condição de céu [T.1], foram excluídos do Modelo 1. O resumo do modelo exibiu os coeficientes, o erro padrão, o escore z associado e os intervalos de confiança de 95%. Uma das abordagens comuns para avaliação do modelo é através da estatística de *Likelihood-Ratio* (LLR), que testa a hipótese nula de que todos os coeficientes, exceto a constante, são iguais a zero, com um nível de significância inferior a 0,05. Nesse sentido, os resultados foram considerados significativos, conforme indicado pelo valor-p de LLR < 0,05 (2,832e-94).

A Tabela 26 detalha o resultado do Modelo 1, conforme o padrão horário A, das 7h às 10h e 15h às 17h (0), e das 10h às 15h (1). Todas as variáveis independentes demonstraram ter um efeito significativo nas probabilidades logarítmicas de ocorrência de síntese de vitamina D. Com base no resultado do teste de Wald (valor-p de $|z| < 0,05$), verificou-se se cada parâmetro estimado foi significativamente diferente de zero (hipótese nula). Além disso, a probabilidade de síntese de vitamina D aumentou em relação ao grupo de comparação das variáveis explicativas, uma vez que os valores das estimativas dos coeficientes foram positivos, 0,55 e 3,026 (Equação 20).

Tabela 26 – Predição de vitamina D em área aberta – Modelo 1*

Variáveis	Estimativas	Erro padrão	Estatística de Teste (Wald)	P-valor (P > z)	2,5%	97,5%
Constante	0,165	0,085	1,94	0,002	0,002	0,333
PadrãoA [T.1] *	0,558	0,117	4,77	0	0,329	0,788
Condição [T.1] **	3,026	0,206	14,67	0	2,622	3,431

Likelihood-Ratio (LLR) = -880,15; LLR p-value: 2,832e-94

* Considerando horários das 7h às 10h e 15h às 17h como a referência da análise [T.0] e das 10h às 15h sendo o [T.1]

** Condição predominante de céu parcialmente nublado [T.0] e claro [T.1]

$$\ln\left(\frac{\text{Síntese D}}{1-\text{Síntese D}}\right)_{\text{Modelo 1}} = 0,165 + 0,56 * \text{PadrãoA [T.1]} + 3,02 * \text{Condição [T.1]}$$

(Equação 20)

Com base nos grupos excluídos, verificou-se um incremento de 74% na probabilidade de síntese de vitamina D em ambientes urbanos livres de obstrução em relação às primeiras e últimas horas do dia (Padrão A [T.0]). Esse aumento é ainda mais significativo, em aproximadamente 20,6 vezes, quando a condição de céu predominante é sem nuvens, comparada à incidência de raios UV sob céu parcialmente nublado. Esses resultados são coerentes, uma vez que tanto a faixa horária próxima ao meio-dia solar quanto a condição de céu aberto são propícias a uma maior incidência de raios UVB, explicando o aumento nas duas categorias avaliadas. Além disso, há evidência da baixa influência do ozônio, nebulosidade e das massas de ar para as duas situações (Tabela 27 e Figura 67).

Tabela 27 – Razão das chances – Modelo 1*

	Razão das chances (OR***)	Valor z	2,5%	97,5%	Interpretação - Chances de ocorrer evento
Constante	1,18	5,235e-02	0,998	1,394	Aumenta 18%
PadrãoA [T.1] *	1,74	1,842e-06	1,389	2,197	Aumenta 74%
Condição [T.1] **	20,6	9,855e-49	13,765	30,899	Aumenta 20,6x

* Considerando horários das 7h às 10h e 15h às 17h como a referência da análise [T.0] e das 10h às 15h sendo o [T.1]

** Condição predominante de céu [T.0] parcialmente nublado e [T.1] claro; e ***OR = Odds Ratio

PseudoR2 (Cox e Snell) = 0,194 ~ 0,19

PseudoR2 (McFadden) = 0,196 ~ 0,20



Figura 67 – Razão das chances e Intervalos de confiança – Modelo 1

Os resultados do modelo revelaram métricas de avaliação, como o PseudoR2 Cox e Snell e o PseudoR2 McFadden, que indicaram a proporção da variação na variável dependente explicada pelo modelo. Assim, o R² de Cox e Snell atingiu aproximadamente 0,194, o que sugere que o modelo não pode explicar uma medida significativa da variabilidade dos dados, tendo em vista a representação de 19,4%. No entanto, a natureza das variáveis pode justificar um R² alto na predição de síntese de vitamina D. Da mesma forma, o PseudoR2 McFadden indicou valor aproximado de 0,196 ou 19,6% sugerindo que o modelo oferece uma melhoria de cerca de 19,6% em relação ao

modelo nulo. O AIC (Critério de Informação de Akaike) é uma medida que avalia a qualidade do modelo, levando em consideração tanto o ajuste quanto a complexidade do modelo. Quanto menor o valor do AIC, melhor é o ajuste do modelo. O valor calculado de AIC de 1776,2 fornece uma indicação entre a capacidade explicativa do modelo e a penalização pela inclusão de variáveis adicionais.

4.5.2. Regressão logística para predição de síntese de vitamina D em áreas sombreadas (Estações Sombra): Modelo 2

A seguir serão apresentados resultados referentes aos modelos de regressões logísticas caracterizadas pelas medições em áreas urbanas sombreadas (**Modelo 2**). No primeiro momento foi proposto os modelos de regressão considerando a variável preditora - Síntese de vitamina D” (variável dependente) - e as variáveis independentes - Disponibilidade, Condição e Sombreamento - conforme descrição no tópico 4.5.1.

Com base nos resultados da Tabela 28, observou-se que há significância estatística no modelo pelo valor-p de LLR < 0,05 (1,841e-131) e pelo Teste de Wald, cujas variáveis independentes interferem significativamente na ocorrência de síntese de vitamina D, ao nível de significância de 0,05. As estimativas indicaram que todas as variáveis registraram aumento nas chances de ocorrência de síntese D para cada alteração da variável referência, uma vez que os coeficientes têm efeito positivo sobre a probabilidade de produção do hormônio D (Equação 21).

Tabela 28 – Predição de vitamina D em área sombreada – Modelo 2A

Variáveis	Estimativas	Erro padrão	Estatística de Wald (z)	P > z	2,5%	97,5%
Constante	-2,62	0,154	-16,98	0	-2,926	-2,321
PadrãoA [T.1]	0,96	0,112	8,60	0	0,743	1,181
Condição [T.1]	0,27	0,113	2,38	0,017	0,048	0,489
Disponibilidade [T.1]	1,77	0,136	12,97	0	1,503	2,038
Disponibilidade [T.2]	2,18	0,139	15,66	0	1,904	2,449
Sombreamento [T.1]	0,72	0,142	5,04	0	0,439	0,996
Sombreamento [T.2]	1,58	0,138	11,46	0	1,311	1,852

Likelihood-Ratio (LLR) = -1049,6; LLR p-value: 1,841e-131

$$\ln \left(\frac{\text{Síntese D}}{1 - \text{Síntese D}} \right)_{\text{Modelo 2A}} = -2,62 + 0,98 * \text{PadrãoA [T.1]} + 0,27 * \text{Condição [T.1]} + 1,77 * \text{Disponibilidade [T.1]} + 2,18 * \text{Disponibilidade [T.2]} + 0,72 * \text{Sombreamento [T.1]} + 1,58 * \text{Sombreamento [T.2]} \text{ (Equação 21)}$$

A Tabela 29 e Figura 68 apresentam as razões das chances, valor $|z|$, os intervalos de confiança, bem como a interpretação das chances de ocorrer o evento para cada variável avaliada. Em especial para a variável Padrão horário A no período próximo ao meio-dia solar, indicou um aumento de mais de 2 vezes a probabilidade de síntese D. Para condição de céu claro, espera-se um aumento de 30% de chances de ocorrência do evento. Tanto a variável disponibilidade como sombreamento ocorreu crescimentos gradativos, seja com o incremento de fração de céu desobstruída entre 0,20 e 0,50 como também para a mudança de estratégia de sombreamento, com destaque para um acréscimo acima de 8 vezes para fatores de céu superiores a 50% e de 4,8 vezes em obstruções decorrentes apenas de árvores isoladas (Equação 22).

Tabela 29 – Razão das chances – Modelo 2A

	Razão das chances (OR**)	Valor z	2,5%	97,5%	Interpretação - Chances de ocorrer evento
Constante	0,072553	1,11e-64	0,0536	0,098209	Reduz 93%
C(PadrãoA)[T.1]	2,616764	7,80e-18	2,101759	3,257963	Aumenta 2,6x
C(Condição)[T.1]	1,308334	1,70e-02	1,049266	1,631368	Aumenta 30%
C(Disponibilidade)[T.1]	5,87247	1,76e-38	4,494278	7,673292	Aumenta 5,8x
C(Disponibilidade)[T.2]	8,817567	2,61e-55	6,715402	11,57779	Aumenta 8,8x
C(Sombreamento)[T.1]	2,048991	4,58e-07	1,550485	2,707775	Aumenta 2x
C(Sombreamento)[T.2]	4,863957	2,04e-30	3,711253	6,374689	Aumenta 4,8x

PseudoR² (Cox e Snell) = 0,268 ~0,27

PseudoR² (McFadden) = 0,229 ~0,23

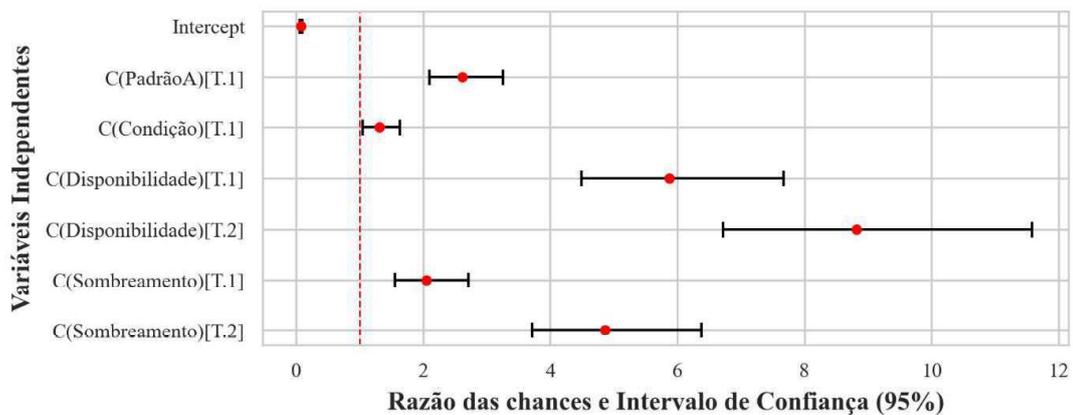


Figura 68 – Razão das chances e intervalo de confiança – Modelo 2A

Da mesma forma que ocorreu no Modelo 1, os resultados do Modelo 2A apresentaram evidências de que mesmo com o impacto do tipo de sombras urbanas (seja por árvores ou por edifícios) e da disponibilidade de céu prevaleceu o aumento da probabilidade de ocorrência de síntese D próximos ao meio-dia solar. Passando de 70% de chances em padrões urbanos com baixa obstrução, a adição das demais variáveis levou a um aumento acima de 2 vezes para contextos urbanos sombreados, seja por árvores e edifícios ou apenas árvores isoladas. Logicamente, a disposição dos edifícios e a densidade das árvores são fatores determinantes para as alterações destes valores. A exposição à radiação UV sob um conjunto de árvores com maior densidade foliar pode reduzir as chances de síntese de vitamina D quando comparadas a árvores isoladas. As métricas de avaliação do Modelo 2A indicaram que o modelo pode ser explicado entre 23% e 27% para o PseudoR2 Cox e Snell e o PseudoR2 McFadden, respectivamente.

Para o Modelo 2B, observou-se, a partir da estatística de Wald, que a classe do padrão horário B nas faixas das 11h às 14h, não mostrou significância estatística compatível com o limite estabelecido, não havendo diferença e representada pelo resultado do p-valor de 0,247 maior que o atribuído para o estudo - significância $> 0,05$ (Tabela 30). Isto é um indicativo que este estimador não tem contribuição significativa para o aumento da chance de ocorrência de síntese D. Como não há diferença estatística entre o Padrão B [T.0] e [T.1], estes dados foram agrupando na mesma categoria de referência [T.0]. Sendo assim, ajustou-se um segundo modelo (Modelo 2B Ajustado) apresentado na Tabela 31. O modelo matemático desta previsão está representado na Equação 23.

Tabela 30 – Predição de vitamina D em área sombreada – Modelo 2B

Variáveis	Estimativas	Erro padrão	Estatística de Wald (z)	P-valor (z)	2,5%	97,5%
Constante	-1,761	0,163	-10,82	0	-2,08	-1,44
PadrãoB [T.1]	0,150	0,13	1,16	0,247	-0,10	0,40
PadrãoB [T.2]	-2,249	0,21	-10,54	0	-2,66	-1,83
Condição [T.1]	-0,334	0,12	-2,62	0	-0,58	-0,08
Disponibilidade [T.1]	1,867	0,14	13,32	0	1,59	2,14
Disponibilidade [T.2]	2,311	0,15	15,58	0	2,02	2,60
Sombreamento [T.1]	0,748	0,14	5,18	0	0,46	1,03

Sombreamento [T.2]	1,833	0,15	12,22	0	1,53	2,12
--------------------	-------	------	-------	---	------	------

Tabela 31 – Predição de vitamina D em área sombreada – Modelo 2B Ajustado

Variáveis	Estimativas	Erro padrão	Estatística de Wald (z)	P-valor (z)	2,5%	97,5%
Constante	-1,6492	0,129	-12,783	0,000	-1,902	-1,396
PadrãoB2 [T.2]	-2,3688	0,187	-12,640	0,000	-2,736	-2,001
Condição [T.1]	-0,3782	0,122	-3,104	0,002	-0,617	-0,139
Disponibilidade [T.1]	1,8680	0,140	13,331	0,000	1,593	2,143
Disponibilidade [T.2]	2,3224	0,148	15,656	0,000	2,032	2,613
Sombreamento [T.1]	0,7408	0,144	5,153	0,000	0,459	1,023
Sombreamento [T.2]	1,8461	0,150	12,294	0,000	1,552	2,140

Likelihood-Ratio (LLR) = -986,60; LLR p-value: 1,135e-158

$$\ln \left(\frac{\text{Síntese D}}{1 - \text{Síntese D}} \right)_{\text{Modelo 2B}} = -1,64 - 2,37 * \text{PadrãoB [T.2]} - 0,38 *$$

Condição [T.1] + 1,87 * *Disponibilidade [T.1]* + 2,32 * *Disponibilidade [T.2]* + 0,74 * *Sombreamento [T.1]* + 1,84 * *Sombreamento [T.2]* (Equação 23)

O Modelo 2B ajustado apresentou significância estatística em todas as variáveis (P-valor < 0,05). Analisando as estimativas das variáveis, as faixas horárias após 14h e a condição de céu parcialmente nublado registraram valores negativos, sendo este um indicativo para a redução das chances de síntese D. Similar ao Modelo 2A, os demais estimadores apresentaram efeito positivo com crescimento gradativo à medida que aumentaram as frações de céu e que alteraram as estratégias de sombreamento (Tabela 32). O valor p de LLR foi menor que 0,05 (LLR = 1,135e-158).

Tabela 32 – Razão das chances – Modelo 2B Ajustado

	Razão das chances (OR**)	Valor z	2,5%	97,5%	Interpretação - Chances de ocorrer evento
Constante	0,192199	2,04e-37	0,149256	0,247497	Reduz 81%
PadrãoB2 [T.3]	0,093595	1,27e-36	0,064823	0,135136	Reduz 91%
Condição [T.2]	0,685082	1,91e-03	0,53954	0,869885	Reduz 32%
Disponibilidade [T.2]	6,475485	1,53e-40	4,92033	8,522174	Aumenta 6,5x
Disponibilidade [T.3]	10,19988	3,03e-55	7,62656	13,64147	Aumenta 10x
Sombreamento [T.2]	2,097697	2,57e-07	1,582569	2,780501	Aumenta 2x
Sombreamento [T.3]	6,335316	9,74e-35	4,720071	8,503309	Aumenta 6x

PseudoR² (Cox e Snell) = 0,31
PseudoR² (McFadden) = 0,28

A probabilidade de ocorrência de síntese D para o Modelo 2B ajustado foi marcado por reduções de 91% das chances quando se comparou antes das 14h com horários após as 14h até o final da tarde. As exposições solares após as 14h reduziram tanto as chances de produção do hormônio D como também a ocorrência de queimaduras na pele. Do mesmo modo, a condição de céu parcialmente nublado atingiu diminuição de 91% em relação ao céu aberto/claro, sem a presença de nuvens. Quando se trata da disponibilidade de céu, as frações de céu entre 20% e 50% se destacaram com chances superiores a 6 vezes quando comparadas as estações com frações abaixo de 20%. Ainda, acima de 50% aumentaram em 10 vezes, sendo locais propícios para maior ocorrência de síntese de vitamina D (Figura 69).

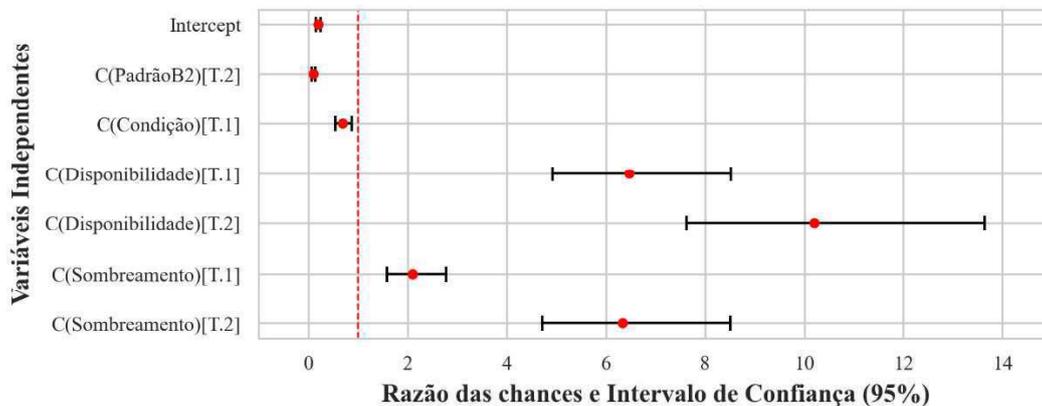


Figura 69 – Razão das chances e Intervalo de confiança – Modelo 2B Ajustado

Além de incrementar as chances de ocorrências benéficas à saúde, o tempo para produção do hormônio D é sempre inferior ao de queimaduras solares (Mckenzie *et al.*, 2009). Vale destacar ainda que quando o tempo de exposição solar excede ao que o tipo de pele suporta pode desencadear uma grande probabilidade de aparecimento de eritemas. Apesar do tempo de exposição não ser levado em consideração neste estudo, ele é um fator imprescindível para avaliação da síntese de vitamina D.

O Modelo 2C representou a regressão com a inserção de faixas horárias a cada 2h de incidência de radiação UV. Ainda, foi observado que das 9h às 11h não apresentou diferenças significativas em relação a variável horária referência (Padrão C [T.0] = 7h às 9h), uma vez que registrou p-valor maior que o nível de significância de 0,05 (P-valor = 0,38). As demais variáveis independentes resultaram em estimadores com significância estatística pelo teste de Wald (p-valor > 0,05) (Tabela 33).

Tabela 33 – Predição de vitamina D em área sombreada – Modelo 2C

Variáveis	Estimativas	Erro padrão	Estatística de Wald (z)	P-valor (z)	2,5%	97,5%
Constante	-1,459	0,179	-8,131	0	-1,811	-1,108
PadrãoC [T.2]	0,149	0,17	0,878	0,38	-0,184	0,483
PadrãoC [T.3]	0,393	0,175	2,246	0,025	0,05	0,737
PadrãoC [T.4]	-0,9043	0,192	-4,701	0	-1,281	-0,527
PadrãoC [T.5]	-2,667	0,237	-11,243	0	-3,132	-2,202
Condição [T.2]	-0,784	0,146	-5,373	0	-1,071	-0,499
Disponibilidade [T.2]	1,868	0,145	12,88	0	1,584	2,152
Disponibilidade [T.3]	2,295	0,151	15,165	0	1,998	2,592
Sombreamento [T.2]	0,797	0,149	5,336	0	0,505	1,091
Sombreamento [T.3]	2,027	0,164	12,386	0	1,707	2,348

Deste modo, foi executado um novo modelo ajustado para a categoria C (Modelo 2C Ajustado) agrupando a variável de significância estatística com a variável referência. Assim, o resultado apresentou todas as variáveis com p-valor < 0,05 considerando os estimadores para o modelo 2C. Os coeficientes das variáveis indicaram que tanto o padrão horário após o meio-dia solar como a condição de céu parcialmente nublado teve efeito negativo, gerando redução na probabilidade de ocorrência. Disponibilidade de céu e estratégia de sombreamento obtiveram efeito positivo para a probabilidade de síntese de vitamina D (Tabela 34). O modelo logístico para categoria C foi representada na Equação 25.

Tabela 34 – Predição de vitamina D em área sombreada – Modelo 2C Ajustado

Variáveis	Estimativas	Erro padrão	Estatística de Wald (z)	P-valor (z)	2,5%	97,5%
Constante	-1,38	0,153	-9,021	0	-1,68	-1,08
PadrãoC [T.3]	0,314	0,15	2,092	0,036	0,02	0,60
PadrãoC [T.4]	-0,984	0,169	-5,831	0	-1,316	-0,654
PadrãoC [T.5]	-2,751	0,218	-12,643	0	-3,178	-2,325
Condição [T.2]	-0,788	0,146	-5,40	0	-1,074	-0,503
Disponibilidade [T.1]	1,884	0,144	13,05	0	1,602	2,167
Disponibilidade [T.2]	2,296	0,151	15,198	0	2	2,592
Sombreamento [T.1]	0,793	0,149	5,327	0	0,50	1,08
Sombreamento [T.2]	2,025	0,164	12,387	0	1,705	2,346

Likelihood-Ratio (LLR)=-958,35; LLR p-value: 9,589e-169

$$\ln\left(\frac{\text{Síntese D}}{1-\text{Síntese D}}\right)_{\text{Modelo 2C}} = -1,38 + 0,31 * \text{PadrãoC [T.3]} - 0,98 * \text{PadrãoC [T.4]} - 2,75 * \text{PadrãoC [T.5]} - 0,79 * \text{Condição [T.1]} + 1,88 * \text{Disponibilidade [T.1]} + 2,30 * \text{Disponibilidade [T.2]} + 0,79 * \text{Sombreamento [T.1]} + 2,02 * \text{Sombreamento [T.2]} \text{ (Equação 25)}$$

Quanto às chances de produção de vitamina D, as exponenciais das estimativas resultaram em aumento de 37% na probabilidade de ocorrer o evento para o padrão horário no turno da manhã e reduções de 62% e 94% no início e fim da tarde, respectivamente, em relação as primeiras horas do dia. Para o céu parcialmente nublado, resultou em razão de 0,454, ou seja, uma diminuição de 54,6%. As variáveis Disponibilidade de céu acima de 20% exibiram aumento das chances de síntese D com similaridades entre os resultados do Modelo 2B. Para Estratégias de sombreamento, os intervalos de confiança de OR para sombras de árvores e edifícios foram entre 1,65 e 2,95 com aumento de 2,2 vezes, e para árvore isolada, de 5,5 a 10,44 com aumento de 7,5 vezes (Tabela 35 e Figura 70).

Tabela 35– Razão das chances – Modelo 2C Ajustado

	Razão das chances (OR**)	Valor z	2,5%	97,5%	Interpretação - Chances de ocorrer evento
Constante	0,251	1,86e-19	0,18	0,33	Reduz 74,9%
PadrãoC [T.3]	1,369	3,36e-02	1,02	0,52	Aumenta 37%
PadrãoC [T.4]	0,373	5,52e-09	0,26	0,52	Reduz 62,7%
PadrãoC [T.5]	0,063	1,22e-36	0,04	0,09	Reduz 94%
Condição [T.2]	0,454	6,38e-08	0,34	0,60	Reduz 54,6%
Disponibilidade [T.2]	6,583	5,68e-39	4,96	8,73	Aumenta 6,5x
Disponibilidade [T.3]	9,934	3,66e-52	7,38	13,35	Aumenta 9,9x
Sombreamento [T.2]	2,21	9,97e-08	1,65	2,95	Aumenta 2,2x
Sombreamento [T.3]	7,581	3,05e-35	5,50	10,44	Aumenta 7,5x

PseudoR² (Cox e Snell) = 0,33

PseudoR² (McFadden) = 0,30

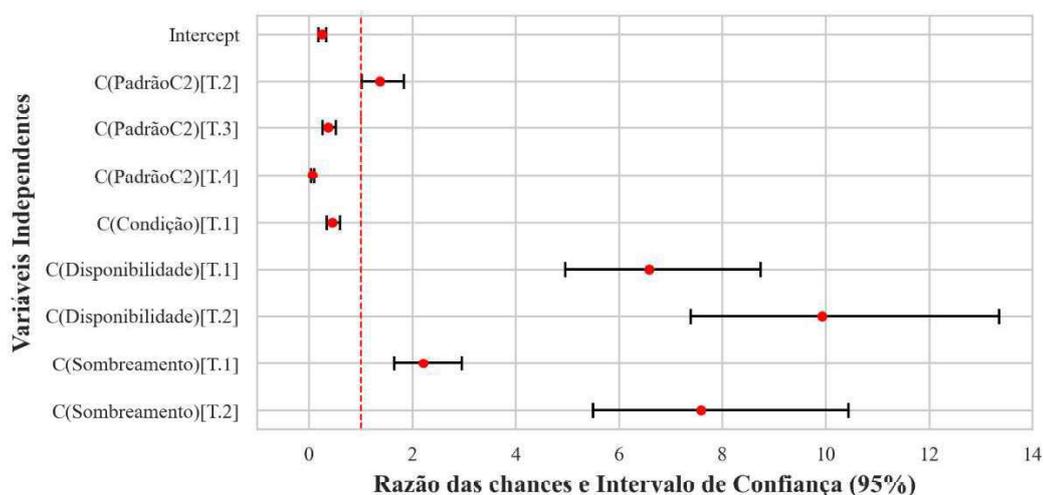


Figura 70 – Razão das chances e Intervalo de confiança – Modelo 2C

Por último, o Modelo 2D foi testado utilizando estimadores de Padrão Horário referentes a um tempo de exposição de 1 hora, resultando em 10 faixas horárias (das 7h às 17h). O modelo revelou, assim como os modelos B e C, que as primeiras três horas de medição alcançaram significância estatística com o Teste de Wald, resultando em p-valor de 0,992 e 0,058, respectivamente. Entretanto, as demais não apresentaram p-valor superior a 0,05, levando à rejeição da hipótese nula de igualdade entre a variável referência Padrão D [T.0] (Tabela 36).

Tabela 36 – Predição de vitamina D em área sombreada – Modelo 2D

Variáveis	Estimativas	Erro padrão	Estatística de Wald (z)	P-valor (z)	2,5%	97,5%
Constante	-1,363	0,233	-5,86	0	-1,819	-0,908
PadrãoD [T.1]	0,0026	0,258	0,01	0,992	-0,503	0,508
PadrãoD [T.2]	-0,503	0,265	-1,898	0,058	-1,024	0,016
PadrãoD [T.3]	0,591	0,265	2,231	0,026	0,072	1,112
PadrãoD [T.4]	1,102	0,264	4,176	0	0,585	1,62
PadrãoD [T.5]	-1,037	0,293	-3,538	0	-1,612	-0,463
PadrãoD [T.6]	-1,124	0,28	-4,019	0	-1,673	-0,576
PadrãoD [T.7]	-1,713	0,288	-5,956	0	-2,277	-1,15
PadrãoD [T.8]	-1,913	0,34	-6,301	0	-2,509	-1,318
PadrãoD [T.9]	-4,919	0,411	-11,974	0	-5,725	-4,115
Condição [T.1]	-1,455	0,189	-7,693	0	-1,826	-1,084
Disponibilidade [T.1]	2,673	0,182	14,675	0	2,317	3,031
Disponibilidade [T.2]	2,769	0,177	15,621	0	2,422	3,117
Sombreamento [T.1]	0,70	0,163	4,284	0	0,38	1,021
Sombreamento [T.2]	2,441	0,194	12,572	0	2,061	2,823

Diante dessa constatação, o modelo passou por uma reformulação, considerando a exclusão das variáveis não significativas e refinando a análise para aprimorar a precisão das previsões. Esse procedimento visa tornar o modelo mais robusto e eficaz. Na predição da síntese de vitamina D no Modelo 2D ajustado, todas as variáveis demonstraram ser relevantes. Após a exclusão das variáveis não significativas, a significância estatística persistiu nas variáveis remanescentes, assegurando que apenas as variáveis estatisticamente relevantes permanecessem no modelo final (Tabela 37 e Equação 26).

Tabela 37 – Predição de vitamina D em área sombreada – Modelo 2D Ajustado

Variáveis	Estimativas	Erro padrão	Estatística de Wald (z)	P-valor (z)	2,5%	97,5%
Constante	-1,528	0,179	-8,533	0	-1,880	-1,177
PadrãoD [T.3]	0,766	0,209	3,669	0	0,357	1,175
PadrãoD [T.4]	1,273	0,206	6,198	0	0,871	1,677
PadrãoD [T.5]	-0,846	0,248	-3,420	0,001	-1,332	-0,361
PadrãoD [T.6]	-0,934	0,231	-4,054	0	-1,386	-0,483
PadrãoD [T.7]	-1,520	0,239	-6,357	0	-1,989	-1,052
PadrãoD [T.8]	-1,741	0,261	-6,663	0	-2,253	-1,229
PadrãoD [T.9]	-4,664	0,367	-12,709	0	-5,383	-3,945
Condição [T.1]	-1,436	0,188	-7,626	0	-1,806	-1,067
Disponibilidade [T.1]	2,586	0,175	14,809	0	2,244	2,929
Disponibilidade [T.2]	2,770	0,178	15,609	0	2,423	3,119
Sombreamento [T.1]	0,706	0,165	4,286	0	0,383	1,029
Sombreamento [T.2]	2,421	0,193	12,554	0	2,043	2,799

PseudoR² (Cox e Snell) = 0,377 ~0,38

PseudoR² (McFadden) = 0,346 ~0,35

$$\ln \left(\frac{\text{Síntese D}}{1 - \text{Síntese D}} \right)_{\text{Modelo 2D}} = -1,52 + 0,77 * \text{PadrãoD [T.4]} + 1,27 * \text{PadrãoD [T.5]} - 0,85 * \text{PadrãoD [T.6]} - 0,93 * \text{PadrãoD [T.7]} - 1,52 * \text{PadrãoD [T.8]} - 1,74 * \text{PadrãoD [T.9]} - 4,66 * \text{PadrãoD [T.10]} - 1,43 * \text{Condição [T.1]} + 2,59 * \text{Disponibilidade [T.1]} + 2,77 * \text{Disponibilidade [T.2]} + 0,70 * \text{Sombreamento [T.1]} + 2,42 * \text{Sombreamento [T.2]} \text{ (Equação 26)}$$

Os resultados indicam que o modelo oferece uma explicação da variação resposta, com PseudoR² (Cox e Snell) aproximadamente 38% e com cerca de 35% pelo PseudoR² (McFadden). Esses índices de pseudo-R² sugerem que o modelo possui uma capacidade razoável de capturar a complexidade das relações entre as variáveis, proporcionando uma visão da eficácia do modelo em explicar as variações observadas.

Quanto à razão das chances, um aumento significativo nas probabilidades de síntese de vitamina D entre 10h e 12h foi observado sendo 2 e 3,5 vezes maiores, respectivamente, em comparação com as três primeiras horas de medição (7h às 10h). Após o meio-dia solar, as chances diminuíram gradativamente ao longo das horas, resultando em reduções de 57,2%, 60,8%, 78,2% e 82,5% em relação à variável de referência Padrão D [T.0, T.1 e T.2] (Tabela 38 e Figura 71).

Tabela 38 – Razão das chances – Modelo 2D Ajustado

	Razão das chances (OR**)	Valor z	2,5%	97,5%	Interpretação - Chances de ocorrer evento
Constante	0,216	1,42e-17	0,152	0,308	Reduz 74%
PadrãoD [T.3]	2,151	2,43e-04	1,428	3,329	Aumenta 2x
PadrãoD [T.4]	3,574	5,72e-10	2,389	5,347	Aumenta 3,5x
PadrãoD [T.5]	0,428	6,26e-04	0,263	0,696	Reduz 57,2%
PadrãoD [T.6]	0,392	5,02e-05	0,249	0,617	Reduz 60,8%
PadrãoD [T.7]	0,218	2,055e-10	0,136	0,349	Reduz 78,2%
PadrãoD [T.8]	0,175	2,68e-11	0,105	0,292	Reduz 82,5%
PadrãoD [T.9]	0,009	5,26e-37	0,004	0,019	Reduz 99%
Condição [T.1]	0,237	2,42e-14	0,164	0,343	Reduz 76,3%
Disponibilidade [T.1]	13,286	1,27e-49	9,435	18,711	Aumenta 13x
Disponibilidade [T.2]	15,97	6,27e-55	11,278	22,616	Aumenta 15,9x
Sombreamento [T.1]	2,026	1,81e-05	1,467	2,798	Aumenta 2x
Sombreamento [T.2]	11,26	3,77e-36	7,716	16,435	Aumenta 11x

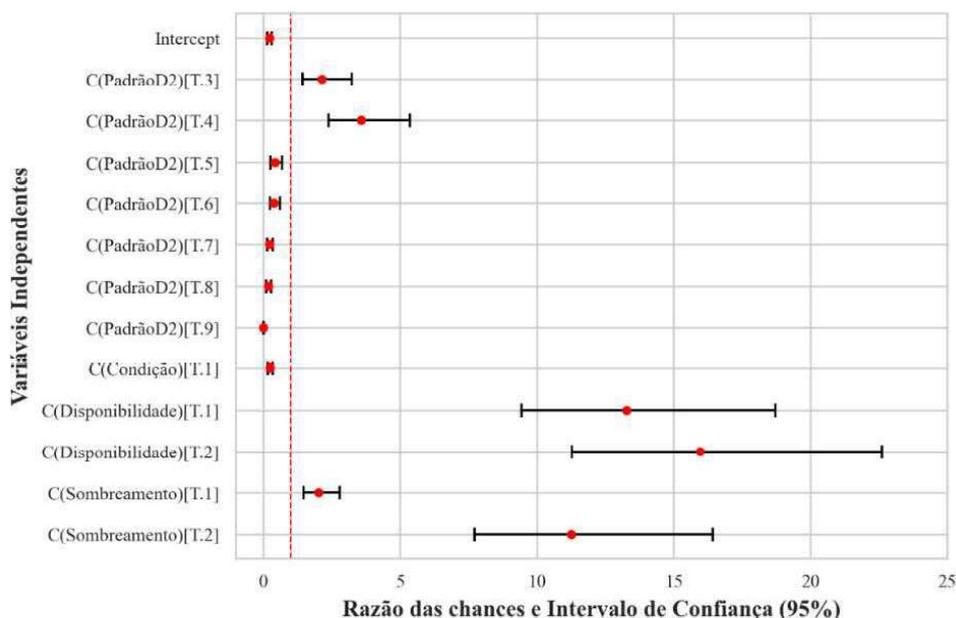


Figura 71 – Razão das chances e Intervalo de confiança – Modelo 2D Ajustado

As chances de produção do hormônio D reduziram em 76,3% comparando a condição de céu parcialmente nublado e claro em áreas sombreadas no meio urbano. As regressões anteriores (Modelo 2A, 2B e 2C) obtiveram menores reduções relativas a esta variável, uma vez que consideraram um tempo de exposição foi superior ao Modelo 2D. Quanto à disponibilidade de céu, o aumento permanece significativo para as faixas acima de 20%, com acréscimos de 13 e 15,9 vezes. Já com as estratégias de sombreamento, o efeito foi mais representativo entre áreas com obstrução de árvore isolada com aumento de 11 vezes, não sendo apontadas diferenças com

os demais modelos sobretudo no aumento das chances em áreas de bloqueio de árvores e edifícios, independentemente da variação no tempo de exposição. Assim, o Modelo 2D também apresentou um aumento de duas vezes a chance de síntese de vitamina D em relação à variável referência, assim como ocorreu nos modelos anteriores.

A avaliação do desempenho dos modelos foi realizada com a utilização da Curva ROC representada pelo gráfico da taxa de verdadeiros positivos (Sensibilidade) em relação a taxa de falso positivo. Segundo classificação definida por Hosmer; Lemeshow; Sturdivant (2013), a área abaixo da curva ROC entre 0,70 e 0,80 são consideradas discriminações aceitáveis e acima de 0,80 são excelentes. Sendo assim, quanto maior o AUC, melhor o modelo consegue prever as ocorrências da síntese de vitamina D de forma efetiva. O Modelo 1 apresentou uma capacidade de discriminação aceitável ($AUC = 0,77 > 0,70$) demonstrando que foi possível prever a probabilidade de síntese do hormônio D em áreas urbanas abertas e com baixa obstrução do céu, considerando estimadores tempo e condição de céu (Figura 72).

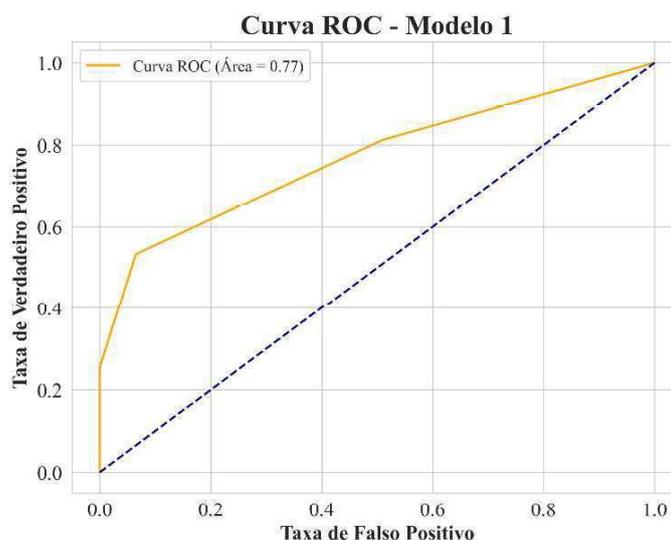


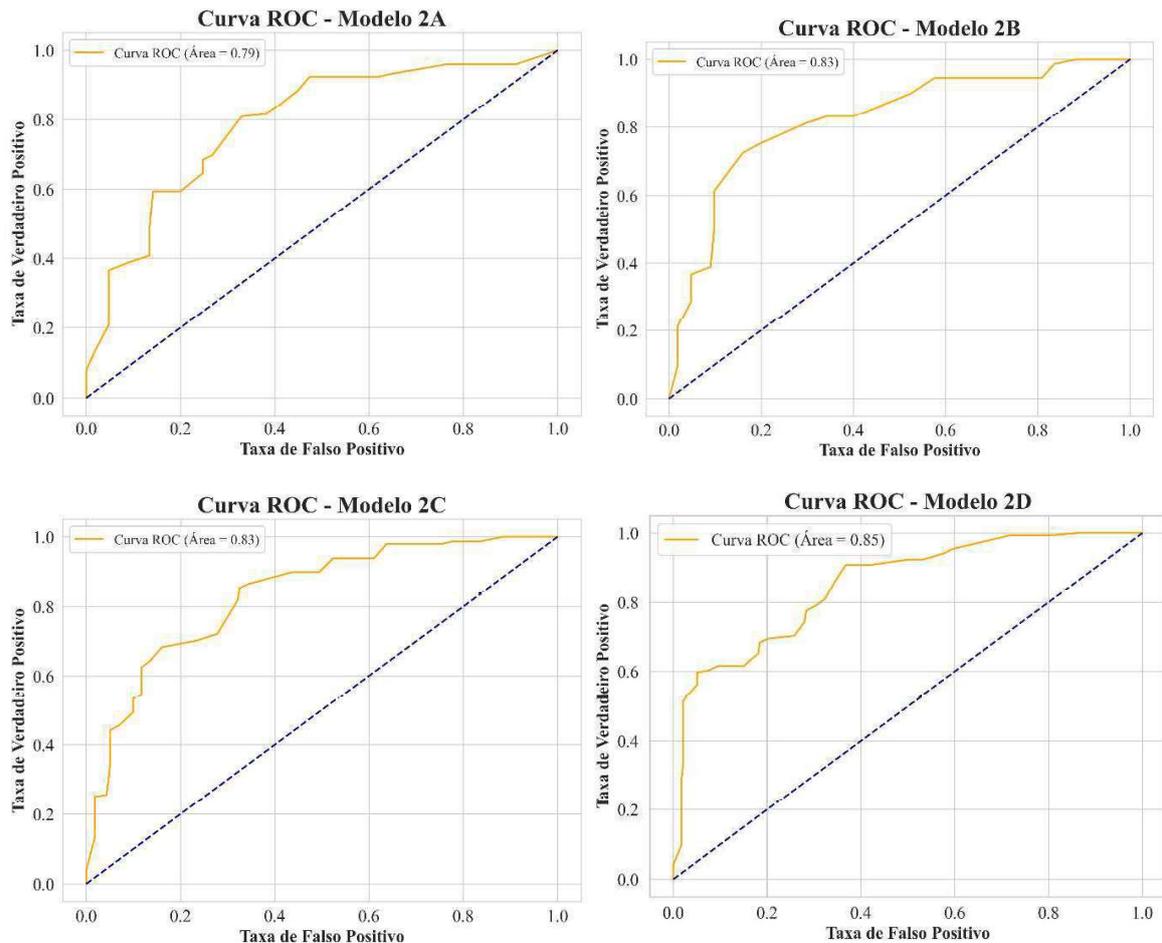
Figura 72 – Curva ROC e Área sobre a curva AUC–Modelo 1

Quanto aos modelos que representaram as áreas urbanas sombreadas todos apresentaram classificações das previsões entre aceitáveis e excelentes, variando de 0,79 a 0,85, onde se notou pequena diferença entre os valores dos indicadores. Os modelos 2B e 2C não obtiveram diferenças nas curvas ROC, registrando AUC equivalente a 0,83. A validação na análise de discriminação pela curva ROC mostrou melhor desempenho para o Modelo 2D Ajustado, cuja diferença ocorreu apenas no padrão horário definido cada 1h de exposição à radiação UV com AUC de 0,85 (Tabela 39 e Figura 73).

Tabela 39 – Indicadores de desempenho dos Modelos

Modelos	AUC	Sensibilidade (Recall)	Acurácia	Precisão	PseudoR ² (CS)	PseudoR ² (MF)	AIC
Modelo 2A	0,79	0,70	0,72	0,66	0,27	0,23	2113,24
Modelo 2B	0,83	0,75	0,78	0,74	0,31	0,28	1987,19
Modelo 2C	0,83	0,68	0,77	0,76	0,33	0,30	1934,71
Modelo 2D	0,8	0,79	0,78	0,72	0,38	0,35	1810,65

AUC = Área sobre a Curva ROC; CS = Cox e Snell; MF = McFadden; AIC = Critério de informação de Akaike

**Figura 73 – Curva ROC e Área sobre a curva AUC – Modelos 2A, 2B, 2C e 2D**

Além da curva ROC com o AUC, outro critério adotado para seleção do melhor modelo de previsão de síntese de vitamina D em áreas urbanas sombreadas foi o Critério de Informação de Akaike (AIC). É comumente utilizado para comparar desempenho de diversos modelos, sendo classificada como o modelo preditivo de melhor performance aquele que apresentar o menor valor de AIC (Tabela 39). Sendo assim, o Modelo 2D permaneceu como o que responde melhor a previsão de síntese de vitamina D em sombras urbanas com AIC igual a 1810,65, tendo como estimadores: padrão horário (a cada 1h de

exposição), condição predominante de céu, obstrução de céu a partir da porção visível e tipo de sombreamento mais comuns no meio urbano, como os elementos arbóreos e os edifícios.

V - CONCLUSÃO

5. CONCLUSÃO

Ao longo desta tese, foram obtidas evidências relevantes sobre a interação entre a obstrução do céu e a radiação solar ultravioleta com propósito de gerar espaços urbanos saudáveis em regiões de baixa latitude. Revisões de literatura e estudos experimentais foram realizados, os quais compõem o núcleo da tese. O estado da arte evidenciou três aspectos principais: análise sobre os **espaços urbanos saudáveis**; avaliação dos impactos da **exposição solar na saúde**, desde os efeitos benéficos (vitamina D) aos deletérios (eritemas); e análise dos **indicadores e métodos** para avaliação da disponibilidade de sol e **obstrução do céu** no meio urbano. O estudo de campo contou com a aplicação do método em três recortes urbanos situados na cidade de João Pessoa/PB, partindo de **aferições de índice ultravioleta, radiação ultravioleta**, bem como a **proposição e aplicação** de **indicadores** de obstrução do céu.

Os dados de radiação solar UV no Brasil são limitados, com uma cobertura temporal e espacial muitas vezes insuficiente devido à presença restrita de estações de monitoramento. A escassez de dados tem motivado pesquisadores a desenvolver e aplicar modelos estatísticos para estimativa da radiação UV com base nas medições de radiação global. Na cidade de João Pessoa/PB, a irradiância UV ponderada para eritema, representada pelo **Índice Ultravioleta (IUV)**, atingiu **valores** máximos com classificação de **extremo risco** ($IUV \geq 11$), com grande variação nos recortes temporais horário, sazonal, diário e mensal quando comparados com a radiação global. Notavelmente, há uma maior concentração de **radiação ultravioleta eritematosa** nos horários próximos do **meio-dia solar** e nos meses referentes às estações de **verão e primavera**. No entanto, nos horários fora da faixa de alerta, definida **antes das 10h e após às 15h**, também foram observados **índices acima da classificação de risco (superiores a 3)**, sendo necessária a proteção contra os raios UV antes do recomendado, sobretudo para o contexto da cidade de **João Pessoa** (latitude 7°S).

Quanto à visibilidade de céu, dois indicadores da obstrução foram avaliados: o *Sky View Factor* (SVF) e o *Sun Coverage Factor* (SCF). A partir destes, foi proposto e desenvolvido o **Fator de Céu segmentado** (FCs). O FCs difere dos demais na divisão da abóbada em **frações de céu** possibilitando a obtenção do indicador em **faixas horárias** ou em períodos do ano. Apesar da forte relação do Fator de Céu segmentado com a incidência

de radiação UV, em algumas estações, a variação ocorrida nos turnos foi determinante pela influência das obstruções, sobretudo dos elementos construídos (edifícios multipavimentos). Em situações em que **edifícios e árvores** coexistem, os padrões de **sombras** se **assemelharam** quanto à obstrução do céu. As zonas obstruídas por **edifício** apresentaram similaridades com as áreas bloqueadas por **troncos**, quando em maior dimensão, e por **árvores**, quando em **maior densidade** de copa.

Os pontos de medições que apresentaram maior disparidade nas incidências de UV foram acompanhados também por diferenças entre obstrução do céu, tendo destaque a Estação **Jacarandá**. Nesta estação, foram detectados maior ocorrência de lacunas e de registros de radiação UV elevados. Já a Estação **Munguba**, formada pela composição de árvores sobrepostas (em *cluster*), apresentou porções visíveis de céu bem restritas (FCs inferiores a 5%), acarretando maior atenuação de raios UV. Apesar das similaridades entre a obstrução do céu das Estações **Ipê Rosa** (FCs = 12%) e **Olho de Pombo** (FCs = 10%), outros fatores foram determinantes para a diferença das radiações UV. Um deles se deve às medições não ocorrerem em períodos concomitantes e, ainda, pela variação das condições de céu. Essas diferenças foram corroboradas pela radiação UV aferida na estação referência e com mínimo impacto do entorno (**Estação Sol**). Sendo assim, o mesmo padrão de sombreamento não sinalizou semelhanças nos dados de radiação UV dessas estações. Como forma de avaliar o alcance de proteção, determinou-se o **fator de atenuação** como indicativo para as áreas protetivas contra a exposição excessiva de UV e possíveis riscos de queimaduras. As estações com menor contribuição da incidência de raios UV e maior atenuação foram Munguba e Ipê Rosa, inseridas em recorte urbano adensado, e Jamelão, definida por árvore isolada e mínima interferência do entorno.

Embora seja importante a exposição solar moderada para síntese de vitamina D, é essencial equilibrar com medidas protetivas para minimizar os danos à saúde. Assim, as **sombras urbanas** vêm como proposta para geração de **espaços mais saudáveis**. Ao analisar o efeito das variáveis Fator de Céu segmentado, tipos de sombreamento, faixas horárias e condição de céu, verificou-se que há **possibilidade de síntese de vitamina D** em áreas **parcialmente sombreadas**, sob **céu claro** e em horários próximos ao **meio-dia solar**. No entanto, existe **variação** na magnitude da **radiação UV** em função da obstrução do céu, com alcances **abaixo de 20%**, como sendo as **menos propensas** a apresentar incidência

significativa de raios UV e **menos chances** de síntese de vitamina D. Frações de céu **entre 20% e 50%**, definidas como faixas moderadas, e **acima de 50%**, como faixa de alerta para o tempo de exposição, **acusaram maior probabilidade de se produzir o hormônio D**. O tipo de sombreamento referente à **árvore isolada** se mostrou **mais eficaz** na incidência de raios UV quando relacionada com as demais estratégias. Ainda, as chances de ocorrência de síntese de vitamina D podem ser reduzidas em contextos urbanos com copa densa, troncos largos e a presença de edifícios multipavimentos. Estas condições foram mais frequentes a partir das 14h, o que justifica a redução das incidências de raios UV no turno da tarde. Quanto ao padrão horário, a **partir das 8h**, a **radiação UV** se mostrou **suficiente** para a **síntese da vitamina D** em locais sob **sombras urbanas** e com **menor** impacto das **obstruções** do céu (FCs > 0,50). No entanto, as chances aumentaram gradativamente após às 10h, sob céu claro. Para períodos que antecedem às 7h não foram registradas chances de produção de vitamina D mesmo em áreas de céu desobstruídos.

Os resultados desta pesquisa ressaltam a importância das características morfológicas dos espaços verdes urbanos na regulação da exposição da pele humana à radiação ultravioleta (UV) suberitemal. Ainda, a presença de áreas sombreadas pode desempenhar um papel fundamental na proteção aos raios nocivos e no fornecimento de comprimentos de onda específicos para a síntese de vitamina D. Essas descobertas evidenciam os benefícios potenciais das áreas verdes sombreadas em ambientes urbanos, destacando também sua contribuição para a manutenção da saúde. Assim sendo, políticas públicas de planejamento urbano podem ser implementadas para auxiliar na criação e melhorias de espaços verdes, como parques, praças e áreas de lazer, e na construção de comunidades mais resilientes e saudáveis.

5.1. Limitações da pesquisa

No decorrer da pesquisa, algumas limitações foram identificadas:

- A necessidade de medições em mais estações com maior diversidade de padrões de sombreamento e em outros períodos do ano;
- A pesquisa não fez uso de equipamentos específicos, como piranômetros com ponderação para síntese de vitamina D e para queimadura solar, a fim de realizar medições concomitantes.

- O equipamento utilizado apresentou limitações quanto ao tempo de execução das medições (SENSU ML-8511). Não foi possível realizar aferições em faixa de tempo superiores a 4h ininterruptas, sendo este o tempo limite da bateria do equipamento. Assim, um maior alcance do tempo seria ideal, como 12h seguidas, em dias consecutivos. Diante da baixa resistência à respingos, só foi possível realizar medições em dias de céu claro e parcialmente coberto (sem chuvas).
- Por se tratar de um confortímetro adaptado para medições ultravioletas, o equipamento foi utilizado inicialmente com acurácia desconhecida, tendo análise comparativa com equipamento calibrado em fase posterior. Diante da pandemia, ocorreu atraso na pesquisa e o equipamento utilizado como referência em acurácia estava indisponível no momento. Esse ocorrido ocasionou atraso na calibração.

5.2. Sugestões de trabalhos futuros

A partir das considerações apresentadas nos tópicos anteriores (5 e 5.1), os principais pontos abordados apontam para direções futuras de pesquisa. São elas:

- Desenvolvimento de software para determinação da obstrução do céu com possibilidade de alterações na subdivisão, tendo a localização/ latitude e faixa horária desejada como dados de entrada. Como foi utilizado software de imagem para geração dos diagramas, o tempo de execução foi prolongado. Sugere-se realizar a simulação dos Fatores de Céu segmentado de forma automatizada associado com o software Rayman;
- Avaliação do impacto da radiação difusa na faixa ultravioleta com ação ponderada para síntese de vitamina D e queimadura solar, incluindo medições com condições de céu encoberto;
- Investigação envolvendo outras espécies arbóreas com maior detalhamento morfológico e a inserção de outros indicadores para avaliação de árvores, como a determinação da densidade de copa e o índice de área foliar, relacionando com as variações de radiação UV;
- Estimativa da síntese de vitamina D para outros tipos de pele, incluindo novas variáveis para melhoria do modelo preditivo, tais como: definição mais precisa das

características de céu, não considerando apenas a condição predominante; medições de coluna de ozônio, aerossol; e radiações UV ponderadas;

- Realização de experimentos com utilização de dosímetros, envolvendo comportamento dos usuários do espaço urbano, como: periodicidade e tempo de exposição, faixa etária, histórico de doenças, frequência de uso de proteção solar e área de pele exposta;
- Análise do comportamento de outros fatores, como a temperatura do ar, sendo uma hipótese para a escolha de permanência em áreas sombreadas: Com o aumento da temperatura do ar, é natural que haja uma maior busca por áreas sombreadas por parte do usuário do espaço urbano.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-1: Edifícios habitacionais – Parte 1: Requisitos Gerais**. Rio de Janeiro, 2021.

AUSTRALIA. **Guide on Exposure to Solar Ultraviolet Radiation (UVR)**. [s.l: s.n.].

AUTIER, P.; DORÉ, J. F. Ultraviolet radiation and cutaneous melanoma: A historical perspective. **Melanoma Research**, v. 30, n. 2, p. 113–125, mar. 2020.

BENVENUTO-ANDRADE, C. *et al.* Sun Exposure and Sun Protection Habits Among High-school Adolescents in Porto Alegre, Brazil¶. **Photochemistry and Photobiology**, v. 81, n. 3, p. 630, 2005.

BILBAO, J.; MATEOS, D.; MIGUEL, A. DE. Analysis and cloudiness influence on UV total irradiation. **International Journal of Climatology**, v. 31, n. 3, p. 451–460, 15 mar. 2011.

BOUBEKRI, M. **Daylighting, Architecture and Health**. 1st. ed. Oxford: Elsevier Ltd, 2008.

BRASIL. **Lei federal nº 12.651**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://legislacao.presidencia.gov.br/atos/?tipo=LEI&numero=12651&ano=2012&ato=a48QTVU1kMVpWT59b>>. Acesso em: 22 jan. 2024.

CALCABRINI, A. *et al.* A simplified skyline-based method for estimating the annual solar energy potential in urban environments. **Nature Energy**, v. 4, n. 3, p. 206–215, 1 mar. 2019.

CANADA, J.; PEDROS, G.; BOSCA, J. V. Relationships between UV (0.290–0.385 μm) and broad band solar radiation hourly values in Valencia and Córdoba, Spain. **Energy**, v. 28, n. 3, p. 199–217, 1 mar. 2003.

CANCER RESEARCH UK. **Sun Safety**. Disponível em: <cancerresearchuk.org/about-cancer/causes-of-cancer/sun-uv-and-cancer/sun-safety>. Acesso em: 16 fev. 2023.

CAPELUTO, I. G. Energy performance of the self-shading building envelope. **Energy and Buildings**, v. 35, n. 3, p. 327–336, 1 mar. 2003.

CAPELUTO, I. G.; PLOTNIKOV, B. A method for the generation of climate-based, context-dependent parametric solar envelopes. **Architectural Science Review**, v. 60, n. 5, p. 395–407, 2017.

CAPELUTO, I. G.; SHAVIV, P. E. Modeling the design of urban fabric with solar rights considerations. **IBPSA Conference Proceedings**, p. 1341–1347, 1999.

CARDOSO, F. C. *et al.* Normality tests: a study of residuals obtained on time series tendency modeling. **Exacta**, 3 abr. 2023.

CHAPMAN, L.; THORNES, J. E. Real-Time Sky-View Factor Calculation and Approximation. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 21, n. 5, p. 730–741, out. 2003.

DARAMOLA, M. T.; BALOGUN, I. A. Analysis of the urban surface thermal condition based on sky-view factor and vegetation cover. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 15, p. 100253, 1 ago. 2019.

DARULA, S.; CHRISTOFFERSEN, J.; MALIKOVA, M. **Sunlight and insolation of building interiors**. Energy Procedia. **Anais...Elsevier Ltd**, 1 nov. 2015.

DAVIS. **UV Sensor: Vantage Pro2 Accessories**. [s.l: s.n.].

DELCOURT, C. *et al.* Lifetime exposure to ambient ultraviolet radiation and the risk for cataract extraction and age-related macular degeneration: The alienor study. **Investigative Ophthalmology and Visual Science**, v. 55, n. 11, p. 7619–7627, 2014.

DEVORE, J. L.; CORDEIRO, M. T. A. **Probabilidade e estatística para engenharia e ciências**. 1ª ed. São Paulo: [s.n.].

DIFFEY, B. Do we need a revised public health policy on sun exposure? **British Journal of Dermatology**, v. 154, n. 6, p. 1046–1051, jun. 2006.

DOWNS, N. J. *et al.* Comparing the annualised dynamic shade characteristics of twenty-one tree canopies across twenty-six municipalities in a high ambient UV climate, Queensland - Australia. **Applied Geography**, v. 108, p. 74–82, 2019.

DU, K.; NING, J.; YAN, L. How long is the sun duration in a street canyon? — Analysis of the view factors of street canyons. **Building and Environment**, v. 172, 1 abr. 2020.

DURAZO-ARVIZU, R. A. *et al.* 25-Hydroxyvitamin D in African-origin populations at varying latitudes challenges the construct of a physiologic norm. **American Journal of Clinical Nutrition**, v. 100, n. 3, p. 908–914, 1 set. 2014.

ENGELSEN, O. **The relationship between ultraviolet radiation exposure and vitamin D status.** **Nutrients**MDPI AG, , 2010.

EPA. **A Guide to UV Index.** [s.l: s.n.].

ESCOBEDO, J. F. *et al.* Modeling hourly and daily fractions of UV, PAR and NIR to global solar radiation under various sky conditions at Botucatu, Brazil. **Applied Energy**, v. 86, n. 3, p. 299–309, 2009.

FERNANDES, M. R.; BARRETO JUNIOR, W. DOS R. Association between physical activity and vitamin D: A narrative literature review. **Revista da Associação Médica Brasileira**, v. 63, n. 6, p. 550–556, jun. 2017.

FITZPATRICK, T. B. The Validity and Practicality of Sun-Reactive Skin Types I Through VI. **Arch Dermatol**, v. 124, p. 869–871, 1988.

FONTANIVE, T. O. *et al.* Seasonal variation of vitamin D among healthy adult men in a subtropical region. **Revista da Associação Médica Brasileira**, v. 66, n. 10, p. 1431–1436, 1 nov. 2020.

FREEDMAN, D. M. *et al.* Sunlight and other determinants of circulating 25-hydroxyvitamin D levels in black and white participants in a nationwide US study. **American Journal of Epidemiology**, v. 177, n. 2, p. 180–192, jan. 2013.

GÁL, T.; UNGER, J. A new software tool for SVF calculations using building and tree-crown databases. **Urban Climate**, v. 10, n. P3, p. 594–606, 1 dez. 2014.

GHAISYANI, O. **Application of Arduino programming using ML8511: UV sensor hookup guide to learning the effect of ultraviolet's level**. The 4th International Conference on Mathematics and Science Education (ICoMSE). **Anais...**Malang: Faculty of Mathematics and Natural Sciences - Universitas Negeri Malang, 25 ago. 2020. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/353847630>>

GIES, P. *et al.* Assessment of the UVR Protection Provided by Different Tree Species. **Photochemistry and Photobiology**, v. 83, p. 1465–1470, 2007.

GOOGLE. **Googlemaps**. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps>>. Acesso em: 7 jan. 2024.

GRANT, R. H. Biologically Active Radiation in the Vicinity of a Single Tree. **Photochemistry and Photobiology**, v. 65, n. 6, p. 974–982, 1997.

GRANT, R. H.; HEISLER, G. M.; GAO, W. Estimation of Pedestrian Level UV Exposure Under Trees ¶. **Photochemistry and Photobiology**, v. 75, n. 4, p. 369–376, 2002.

GRANT, W. B.; BHATTOA, H. P.; PLUDOWSKI, P. Determinants of Vitamin D Deficiency From Sun Exposure: A Global Perspective. Em: **Vitamin D: Fourth Edition**. [s.l.] Elsevier Inc., 2017. v. 2p. 79–90.

GRUBER-BZURA, B. M. Vitamin D and influenza—Prevention or therapy? **International Journal of Molecular Sciences**, v. 19, n. 8, 16 ago. 2018.

GUASP, M.; LAREDO, C.; URRÁ, X. Higher solar irradiance is associated with a lower incidence of coronavirus disease 2019. **Clinical Infectious Diseases**, v. 71, n. 16, p. 2269–2271, 15 out. 2020.

HABTE, A. *et al.* **Estimating Ultraviolet Radiation from Total Radiation**. Solar Power International. **Anais...**Anaheim, CA: set. 2018. Disponível em: <<http://lib.myilibrary.com?id=1039678>>

HASEGAWA, J.; KUMAKURA, E.; ICHINOSE, M. Ultraviolet Radiation on an Urban Street with High-Rise Buildings in Asia. **Procedia Environmental Sciences**, v. 38, p. 627–634, 2017.

HEISLER, G. M.; GRANT, R. H. **Ultraviolet radiation, human health, and the urban forest**. [s.l.: s.n.].

HLAING, W. S. W. Construction and data acquisition of UV radiation meter. **J. Myanmar Acad. Arts Sci**, v. XVIII, n. 2B, p. 479–487, 2020.

HOLICK, M. F. Vitamin D: A D-Lightful solution for health. **J Investig Med**, v. 59, n. 6, p. 872–880, 2011.

HOLLOWAY, L. Atmospheric sun protection factor on clear days: its observed dependence on solar zenith angle and its relevance to the shadow rule for sun protection. **Photochemistry and Photobiology**, v. 56, n. 2, p. 229–234, 1992.

HOPKINSON, R. G.; PETHERBRIDGE, P.; LONGMORE, J. **Daylighting**. London: [s.n.].

HOSMER, D. W.; LEMESHOW, S.; STURDIVANT, R. X. **Applied logistic regression**. 3^a ed. [s.l.] Wiley Series in Probability and Statistics, 2013. v. 398

HOSSEIN-NEZHAD, A.; HOLICK, M. F. **Vitamin D for health: A global perspective**. Mayo Clinic Proceedings. **Anais...Elsevier Ltd**, 2013.

HYNDMAN, R.; ATHANASOPOULOS, G. **Forecasting: Principles and Practice**. 3rd. ed. [s.l.] OTexts, 2021.

IGOE, D. P. *et al.* Evaluation of shade profiles while walking in urban environments: A case study from inner suburban Sydney, Australia. **Building and Environment**, v. 177, 15 jun. 2020.

INMET. **Banco de dados meteorológico para ensino e pesquisa-João Pessoa/PB**. Disponível em: <<https://bdmep.inmet.gov.br/>>. Acesso em: 28 jun. 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE FLORESTAS. **Jacarandá Mimoso**. Disponível em: <<https://www.ibflorestas.org.br/lista-de-especies-nativas/jacaranda-mimoso>>. Acesso em: 7 jan. 2024.

JOHNSON, G.; WATSON, I. The Determination of View-Factors in Urban Canyons. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 23, n. 2, p. 329–335, 1 fev. 1984.

JOHNSTON, P.; MCKENZIE, R.; LILEY, B. **Seasonal and Geographic Variation of Vitamin D Producing Radiation in New Zealand**. Lauder, Nova Zelândia: [s.n.]. Disponível em: <<https://niwa.co.nz/sites/niwa.co.nz/files/import/attachments/Johnston.pdf>>. Acesso em: 5 dez. 2023.

JORGE, N.; MARIA MORENO LUZIA, D. Caracterização do óleo das sementes de *Pachira aquatica* Aublet para aproveitamento alimentar. **Acta Amazonia**, v. 42, n. 1, p. 149–156, 2012.

KABISCH, N.; VAN DEN BOSCH, M.; LAFORTEZZA, R. **The health benefits of nature-based solutions to urbanization challenges for children and the elderly – A systematic review**. **Environmental Research** Academic Press Inc., , 2017.

KNIGHT, T. *et al.* How effective is “greening” of urban areas in reducing human exposure to ground-level ozone concentrations, UV exposure and the “urban heat island effect”? A protocol to update a systematic review. **Environmental Evidence**, v. 5, n. 1, 26 fev. 2016.

KNIGHT, T. *et al.* How effective is ‘greening’ of urban areas in reducing human exposure to ground-level ozone concentrations, UV exposure and the ‘urban heat island effect’? An updated systematic review. **Environmental Evidence**, v. 10, n. 1, 1 dez. 2021.

KNOWLES, R. L. **Solar Envelope Concepts: moderate density building applications**. Los Angeles, California: Solar Energy Research Institute, 1980.

KNOWLES, R. L. The solar envelope: its meaning for energy and buildings. **Energy and Buildings**, v. 35, n. 1, p. 15–25, 1 jan. 2003.

LAN, H.; GOU, Z.; XIE, X. A simplified evaluation method of rooftop solar energy potential based on image semantic segmentation of urban streetscapes. **Solar Energy**, v. 230, p. 912–924, 1 dez. 2021.

LANSIAUX, É. *et al.* Covid-19 and vit-d: Disease mortality negatively correlates with sunlight exposure. **Spatial and Spatio-temporal Epidemiology**, v. 35, 1 nov. 2020.

LAPIS, S. **ML8511 - UV Sensor with Voltage Output**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/LightImaging/ML8511_3-8-13.pdf>. Acesso em: 9 jan. 2024.

LAPIS, S.; ROHM, S. S. **Ultraviolet Sensor IC with Voltage Output: ML8511 UV Photodiode + Amp.** [s.l.: s.n.]. Disponível em: <https://cdn.sparkfun.com/assets/learn_tutorials/2/0/6/ML8511_UV.pdf>. Acesso em: 9 jan. 2024.

LEAL, S. **Medição, análise e mapeamento da radiação solar uv no estado de Pernambuco**. Recife: Universidade Federal de Pernambuco, 31 jan. 2011.

LEDER, S.; PEREIRA, F.; CLARO, A. Janela de céu preferível: proposição de um parâmetro para controle da disponibilidade de luz natural no meio urbano. **Ambiente Construído**, v. 8, n. 1, p. 89–104, 11 abr. 2008.

LEFEBVRE, H. **A Revolução Urbana**. 1ª Reimpressão ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2002.

LEITER, U.; EIGENTLER, T.; GARBE, C. Epidemiology of Skin Cancer. Em: **Sunlight, Vitamin D and Skin Cancer**. 2. ed. New York, NY: Springer, 2014. p. 120–140.

LITTLEFAIR, P. Daylight, sunlight and solar gain in the urban environment. **Solar Energy**, v. 70, n. 3, p. 177–185, 1 jan. 2001.

LITTLEFAIR, P. J. **Site layout planning for daylight and sunlight: a guide to good practice**. 2nd Edition ed. [s.l.] Building Research Establishment., 2011.

LÓPEZ-MORENO, J. I.; LATRON, J. Influence of canopy density on snow distribution in a temperate mountain range. **Hydrological Processes**, v. 22, n. 1, p. 117–126, 1 jan. 2008.

LUCA, F. DE. **Solar Form Finding: Subtractive Solar Envelope and Integrated Solar Collection Computational Method for High-Rise Buildings in Urban Environments**. 37th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA). **Anais...Cambridge**: nov. 2017. Disponível em: <http://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/Show&_id=caadria2010_044/paper/acadia17_212>. Acesso em: 20 jun. 2022

LUCA, F.; DOGAN, T.; SEPÚLVEDA, A. Reverse solar envelope method. A new building form-finding method that can take regulatory frameworks into account. **Automation in Construction**, v. 123, p. 103518, 1 mar. 2021.

MACHETE, R. *et al.* The use of 3D GIS to analyse the influence of urban context on buildings' solar energy potential. **Energy and Buildings**, v. 177, p. 290–302, 15 out. 2018.

MACLAUGHLIN, J. A.; ANDERSON, R. R.; HOLICK, M. F. Spectral Character of Sunlight Modulates Photosynthesis is of previtamin D3 and Its Photoisomers in Human Skin. **Science**, v. 216, n. 4549, p. 1001–1003, mar. 1982.

MADRONICH, S. The Atmosphere and UV-B Radiation at Ground Level. Em: **Environmental UV photobiology**. Boston, MA: Springer, 1993. p. 1–39.

MARSH, A. **The application of shading masks in building simulation**. Montreal: Ninth International IBPSA Conference, 15 ago. 2005. Disponível em: <http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2005/BS05_0725_732.pdf>. Acesso em: 10 set. 2023

MARTINS, T. A. DE L. *et al.* Sensitivity analysis of urban morphology factors regarding solar energy potential of buildings in a Brazilian tropical context. **Solar Energy**, v. 137, p. 11–24, 1 nov. 2016.

MATZARAKIS, A. **Rayman Pro: A tool for Applied Climatology**. Disponível em: <<https://www.urbanclimate.net/rayman/>>. Acesso em: 16 fev. 2023.

MAURY-MORA, M.; GÓMEZ-VILLARINO, M. T.; VARELA-MARTÍNEZ, C. Urban green spaces and stress during COVID-19 lockdown: A case study for the city of Madrid. **Urban Forestry and Urban Greening**, v. 69, 1 mar. 2022.

MCCARTY, C. A. Sunlight exposure assessment: can we accurately assess vitamin D exposure from sunlight questionnaires? 1-3 Catherine A McCarty. **The American Journal of Clinical Nutrition**, v. 87, n. 4, p. 1097–1101, 2008.

MCKENZIE, R. L.; LILEY, J. BEN; BJÖRN, L. O. UV radiation: Balancing risks and benefits. **Photochemistry and Photobiology**, v. 85, n. 1, p. 88–98, jan. 2009.

MEHNATI, P. *et al.* Assessment of solar ultraviolet radiation in Tabriz city, Iran. 2021.

MENDES, M. M. *et al.* Exploring the impact of individual uvb radiation levels on serum 25-hydroxyvitamin D in women living in high versus low latitudes: A cross-sectional analysis from the D-sol study. **Nutrients**, v. 12, n. 12, p. 1–15, 1 dez. 2020.

MIGUEL, A. DE *et al.* Evolution of erythemal and total shortwave solar radiation in Valladolid, Spain: Effects of atmospheric factors. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 73, n. 5–6, p. 578–586, abr. 2011.

MINISTRY OF HEALTH AND CANCER SOCIETY OF NEW ZEALAND. **Consensus statement on vitamin D and sun exposure in New Zealand**. New Zealand: Ministry of Health, 2012.

MIRZAEI, S. *et al.* Neighborhood-scale sky view factor variations with building density and height: A simulation approach and case study of Boston. **Urban Climate**, v. 26, p. 95–108, 1 dez. 2018.

MIURA, N. *et al.* Development of Silicon-on-Insulator (SOI) UV Sensor IC. **Oki Technical Review**, v. 74, n. 3, p. 38–39, 2007.

MULLENDERS, L. H. F. **Solar UV damage to cellular DNA: From mechanisms to biological effects**. **Photochemical and Photobiological Sciences** Royal Society of Chemistry, , 2018.

MUSSELMAN, K. N. *et al.* Influence of canopy structure and direct beam solar irradiance on snowmelt rates in a mixed conifer forest. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 161, p. 46–56, 15 ago. 2012.

NA, H. R. *et al.* Modeling of urban trees' effects on reducing human exposure to UV radiation in Seoul, Korea. **Urban Forestry and Urban Greening**, v. 13, n. 4, p. 785–792, 2014.

NG, E. **A study of relationship between daylight performance and height difference of buildings in high density cities using computational simulation**. Ninth International IBPSA Conference. **Anais...**Montreal: ago. 2005.

NICE GUIDELINE. **Sunlight exposure: Risks and benefits**. Disponível em: <www.nice.org.uk/guidance/ng34>.

NICHOLSON, A. *et al.* Not part of my routine: A qualitative study of use and understanding of UV forecast information and the SunSmart app. **BMC Public Health**, v. 19, n. 1, 16 ago. 2019.

NING, Z. *et al.* High prevalence of vitamin D deficiency in urban health checkup population. **Clinical Nutrition**, v. 35, n. 4, p. 859–863, 1 ago. 2016.

NOBLE, D.; KENSEK, K. Computer generated solar envelopes in architecture. **Journal of Architecture**, v. 3, n. 2, p. 117–127, fev. 1998.

OKE, T. R. Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: Comparison of scale model and field observations. **Journal of Climatology**, v. 1, p. 237–254, 1981.

OKEIL, A. A holistic approach to energy efficient building forms. **Energy and Buildings**, v. 42, n. 9, p. 1437–1444, 1 set. 2010.

OLATUNDE, O. M. *et al.* Design and Construction of Ultraviolet and Incoming Solar Irradiance Sensing Device. **Iraqi Journal of Science**, v. 63, n. 12, p. 5197–5207, 2022.

ONU. **World Urbanization Prospects: The 2018 Revision**. New York, USA, 2019.

OSMANCEVIC, A. *et al.* Vitamin D production after UVB exposure – A comparison of exposed skin regions. **Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology**, v. 143, p. 38–43, 1 fev. 2015a.

OSMANCEVIC, A. *et al.* Size of the exposed body surface area, skin erythema and body mass index predict skin production of vitamin D. **Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology**, v. 149, p. 224–229, 1 ago. 2015b.

OSTERTAGOVÁ, E. **Modelling using polynomial regression**. Procedia Engineering. **Anais...Elsevier Ltd**, 2012.

PAPANDREA, S. *et al.* **Radiómetro solar de banda moderada GUV-2511: Interpretación de los datos y generación de productos**. Buenos Aires: [s.n.]. Disponível em: <<https://repositorio.smn.gob.ar/handle/20.500.12160/1608>>. Acesso em: 9 jan. 2024.

PARISI, A. V.; TURNBULL, D. J. Shade provision for UV minimization: A review. **Photochemistry and Photobiology**, v. 90, n. 3, p. 479–490, 2014.

PARISI, A. V. *et al.* Development of a model for calculating the solar ultraviolet protection factor of small to medium sized built shade structures. **Building and Environment**, v. 147, p. 415–421, 1 jan. 2019.

PAULEIT, S. *et al.* Nature-Based Solutions and Climate Change – Four Shades of Green. Em: KABISCH, N. *et al.* (Eds.). **Nature-based Solutions to Climate Change Adaptation in Urban Areas**. 1º ed. Cham, Switzerland: Springer, 2017. v. 1p. 29–45.

PEREIRA-SANTOS, M. *et al.* Vitamin D deficiency and associated factors among pregnant women of a sunny city in Northeast of Brazil. **Clinical Nutrition ESPEN**, v. 23, p. 240–244, 1 fev. 2018.

PORFIRIO, A. C. S. *et al.* Relações entre irradiância solar ultravioleta, visível e global: Observações em Maceió-AL. **Inpe**, v. 1, 4 ago. 2010.

PROJETO DE LEI 5734/2013. **de 6 de junho de 2013 da Câmara dos Deputados**. , 2013. Disponível em:

<<https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/fichadetramitacao?idProposicao=580055>>.

Acesso em: 11 jan. 2023

RABOUDI, K.; BELKAÏD, A.; SACI, A. B. **Satisfaction of the solar bounding box constraints**. Proceedings - 28th International PLEA Conference on Sustainable Architecture + Urban Design: Opportunities, Limits and Needs - Towards an Environmentally Responsible Architecture, PLEA 2012. **Anais...**2012.

RABOUDI, K.; SACI, A. BEN. **A morphological generator of urban rules of solar control**. 29th Conference, Sustainable Architecture for a Renewable Future. **Anais...**Munich, Germany: set. 2013. Disponível em: <<https://mediatum.ub.tum.de/doc/1169229/file.pdf>>. Acesso em: 21 jun. 2022

RAHMAN, M. A. *et al.* Comparing the transpirational and shading effects of two contrasting urban tree species. **Urban Ecosystems**, v. 22, n. 4, p. 683–697, 2019.

RAZZAQUE, M. S. **Sunlight exposure: Do health benefits outweigh harm?** **Journal of Steroid Biochemistry and Molecular Biology** Elsevier Ltd, , 1 jan. 2018.

REDWEIK, P.; CATITA, C.; BRITO, M. Solar energy potential on roofs and facades in an urban landscape. **Solar Energy**, v. 97, p. 332–341, nov. 2013.

RODRIGUES, A. P.; PASTORE, G. M. **A review of the nutritional composition and current applications of monguba (Pachira aquatica Aubl.) plant**. **Journal of Food Composition and Analysis** Academic Press Inc., 1 jun. 2021.

ROLON-MÉRETTE, D. *et al.* Introduction to Anaconda and Python: Installation and setup. **The Quantitative Methods for Psychology**, v. 16, n. 5, p. S3–S11, 1 maio 2020.

ROSARIO, D. K. A. *et al.* Relationship between COVID-19 and weather: Case study in a tropical country. **International Journal of Hygiene and Environmental Health**, v. 229, 1 ago. 2020.

SAGRIPANTI, J. L.; LYTLE, C. D. Estimated Inactivation of Coronaviruses by Solar Radiation With Special Reference to COVID-19. **Photochemistry and Photobiology**, v. 96, n. 4, p. 731–737, 1 jul. 2020.

SALAMA, A. M. Coronavirus questions that will not go away: interrogating urban and socio-spatial implications of COVID-19 measures. **Emerald Open Research**, v. 2, p. 14, 16 abr. 2020.

SAMEFORS, M.; TENGBLAD, A.; ÖSTGREN, C. J. Sunlight Exposure and Vitamin D Levels in Older People-An Intervention Study in Swedish Nursing Homes. **Journal of Nutrition, Health and Aging**, v. 24, n. 10, p. 1047–1052, 1 dez. 2020.

SANTOS, B. R. *et al.* Vitamin D deficiency in girls from South Brazil: a cross-sectional study on prevalence and association with vitamin D receptor gene variants. **BMC Pediatrics**, v. 12, 8 jun. 2012.

SBEM. **Vitamina D: Novos valores de referência.** Disponível em: <<https://www.endocrino.org.br/vitamina-d-novos-valores-de-referencia/>>. Acesso em: 17 jul. 2022.

SCALCO, V. **Método para a avaliação dos impactos de edificações sobre a iluminação natural e insolação em vizinhanças urbanas.** Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 22 nov. 2010.

SCHALKA, S.; STEINER, D. **Consenso brasileiro de fotoproteção—Fotoproteção no Brasil: Recomendações da Sociedade Brasileira de Dermatologia.** Rio de Janeiro: [s.n.]. Disponível em: <www.sbd.org.br>.

SCRAGG, R. Vitamin D and public health: An overview of recent research on common diseases and mortality in adulthood. **Public Health Nutrition**, v. 14, n. 9, p. 1515–1532, set. 2011.

SEIFFERT, N. F.; THIAGO, L. R. L. S. **Legumineira - Cultura forrageira para produção de proteína.** Campo Grande, MS: EMBRAPA-CNPGC, 1983.

SERRANO, A.; ABRIL-GAGO, J.; GARCÍA-ORELLANA, C. J. Development of a Low-Cost Device for Measuring Ultraviolet Solar Radiation. **Frontiers in Environmental Science**, v. 9, 25 jan. 2022.

SILVA, A. A. Outdoor exposure to solar ultraviolet radiation and legislation in Brazil. **Health Physics**, v. 110, n. 6, p. 623–626, 1 jun. 2016.

SILVA, A. A. The Shadow Rule, the UV Index, and the 5S Steps in the Tropics. **Health Physics**, v. 119, n. 3, p. 358–362, 1 set. 2020.

SLUSKY, D. J. G.; ZECKHAUSER, R. J. Sunlight and Protection Against Influenza. **Economics and Human Biology**, v. 40, 1 jan. 2021.

SMITHERS, R. J. *et al.* Comparing the relative abilities of tree species to cool the urban environment. **Urban Ecosystems**, v. 21, n. 5, p. 851–862, 2018.

SOKOL, N.; MARTYNIUK-PECZEK, J. **The Review of the Selected Challenges for an Incorporation of Daylight Assessment Methods into Urban Planning in Poland.** Procedia Engineering. **Anais...Elsevier Ltd**, 2016.

STEYN, D. G. The calculation of view factors from fisheye-lens photographs: Research note. **Atmosphere - Ocean**, v. 18, n. 3, p. 254–258, 1980.

STEYN, D. G. *et al.* The determination of sky view-factors in urban environments using video imagery. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 3, p. 759–764, dez. 1986.

TANG, L. *et al.* Sunlight ultraviolet radiation dose is negatively correlated with the percent positive of SARS-CoV-2 and four other common human coronaviruses in the U.S. **Science of the Total Environment**, v. 751, 10 jan. 2021.

TENDAIS, I.; RIBEIRO, A. I. Urban green spaces and mental health during the lockdown caused by Covid-19. **Finisterra**, v. 55, n. 115, p. 183–188, 2020.

TIBA, C.; LEAL, S. Modelagem do IUUV a partir da irradiação UV (A+B) em Recife (PE). **Revista Brasileira de Energia Solar Ano**, v. 3, n. 1, p. 8–14, jul. 2012.

TIBA, C.; LEAL, S. D. S. Enhancement of UV radiation by cloud effect in NE of Brazil. **International Journal of Photoenergy**, v. 2017, 2017.

TREGENZA, P. R. Subdivision of the sky hemisphere for luminance measurements. **Lighting Res. Technol.**, v. 19, n. 1, p. 13–14, 1987.

TURNBULL, D. J.; PARISI, A. V. Utilising shade to optimize UV exposure for vitamin D. **Atmos. Chem. Phys**, v. 8, p. 2841–2846, 2008.

UTRILLAS, M. P.; MARTÍNEZ-LOZANO, J. A.; NUÑEZ, M. Ultraviolet Radiation Protection by a Beach Umbrella. **Photochemistry and Photobiology**, v. 86, p. 449–456, 2010.

VAN DER LEUN, J. C. The ozone layer. **Photodermatology, photoimmunology & photomedicine**, v. 20, p. 159–162, 2004.

VARTHOLOMAIOS, A. The residential solar block envelope: A method for enabling the development of compact urban blocks with high passive solar potential. **Energy and Buildings**, v. 99, p. 303–312, 15 jul. 2015.

VIZZOTTO, M.; PEREIRA, M. C. Caracterização das propriedades funcionais do Jambolão. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento - Embrapa**, v. 1, p. 5–26, 2008.

WACKER, M.; HOLICK, M. F. **Sunlight and Vitamin D: A global perspective for health. Dermato-Endocrinology** Landes Bioscience, , 2013.

WAI, K. M.; YU, P. K. N.; LAM, K. S. Reduction of solar UV radiation due to urban high-rise buildings - A coupled modelling study. **PLoS ONE**, v. 10, n. 8, 11 ago. 2015.

WALKER, H. *et al.* Forty years of Slip! Slop! Slap! A call to action on skin cancer prevention for Australia. **Public Health Research and Practice**, v. 32, n. 1, 1 mar. 2022.

WEBB, A. R. *et al.* The vitamin D debate: Translating controlled experiments into reality for human sun exposure times. **Photochemistry and Photobiology**, v. 87, n. 3, p. 741–745, maio 2011.

WEBB, A. R.; ENGELSEN, O. Ultraviolet Exposure Scenarios: Risks of Erythema from Recommendations on Cutaneous Vitamin D Synthesis. Em: REICHRATH, J. (Ed.). **Sunligh, Vitamin D and Skin Cancer**. New York: Springer, 2008. v. 624p. 72–85.

WEBB, A. R.; KLINE, L.; HOLICK, M. F. Influence of Season and Latitude on the Cutaneous Synthesis of Vitamin D 3 : Exposure to Winter Sunlight in Boston and Edmonton Will Not Promote Vitamin D 3 Synthesis in Human Skin*. **Journal of Clinical Endocrinology and Metabolism**, 1988.

WHITE, D. *et al.* Comparing area and shape distortion on polyhedral-based recursive partitions of the sphere. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 12, n. 8, p. 805–827, 1998.

WHO. **Global solar UV index: a practical guide**. [s.l.] World Health Organization, 2002.

WIJATNA, A. B. *et al.* A Study of the Effects of the Ultraviolet Radiation on Tofu as a Skin Tissue. **Journal of Engineering Science and Technology**, v. 14, n. 1, p. 138–148, 2019.

WOLCH, J. R.; BYRNE, J.; NEWELL, J. P. Urban green space, public health, and environmental justice: The challenge of making cities “just green enough”. **Landscape and Urban Planning**, v. 125, p. 234–244, 2014.

XIE, J. *et al.* Urban parks as green buffers during the COVID-19 pandemic. **Sustainability (Switzerland)**, v. 12, n. 17, 1 set. 2020.

YIN, S. *et al.* Comparing cooling efficiency of shading strategies for pedestrian thermal comfort in street canyons of traditional shophouse neighbourhoods in Guangzhou, China. **Urban Climate**, v. 43, p. 101165, maio 2022.

YOUL, P. H.; JANDA, M.; KIMLIN, M. Vitamin D and sun protection: The impact of mixed public health messages in Australia. **International Journal of Cancer**, v. 124, n. 8, p. 1963–1970, 15 abr. 2009.

ZHANG, J. *et al.* Evaluating environmental implications of density: A comparative case study on the relationship between density, urban block typology and sky exposure. **Automation in Construction**, v. 22, p. 90–101, 1 mar. 2012.

ZHANG, J. *et al.* The impact of sky view factor on thermal environments in urban parks in a subtropical coastal city of Australia. **Urban Forestry and Urban Greening**, v. 44, 1 ago. 2019.

ZHANG, X. *et al.* **See UV on Your Skin: An Ultraviolet Sensing and Visualization System**. Proceedings of the 8th International Conference on Body Area Networks. **Anais...set**. 2013.