



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
**Programa De Pós-Graduação em Engenharia
Civil e Ambiental**
- DOUTORADO –

ELIANA DE FÁTIMA DA COSTA LIMA

**LEVANTAMENTO E MODELAGEM DA VEGETAÇÃO ARBÓREA PARA
SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DA ILUMINAÇÃO NATURAL**

JOÃO PESSOA – PB

2023

ELIANA DE FÁTIMA DA COSTA LIMA

**LEVANTAMENTO E MODELAGEM DA VEGETAÇÃO ARBÓREA PARA
SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DA ILUMINAÇÃO NATURAL**

Tese apresentada 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 doutora em Engenharia Civil e Ambiental. Área de concentração: Engenharia urbana.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Solange Maria Leder

JOÃO PESSOA – PB

2023

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

L732l Lima, Eliana de Fátima da Costa.

Levantamento e modelagem da vegetação arbórea para
simulação computacional da iluminação natural / Eliana
de Fátima da Costa Lima. - João Pessoa, 2023.
265 f. : il.

Orientação: Solange Maria Leder.
Tese (Doutorado) - UFPB/CT.

1. Iluminação natural. 2. Vegetação arbórea. 3.
Simulação computacional. I. Leder, Solange Maria. II.
Título.

UFPB/BC

CDU 628.92(043)

***LEVANTAMENTO E MODELAGEM DA VEGETAÇÃO ARBÓREA PARA
SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DA ILUMINAÇÃO NATURAL***

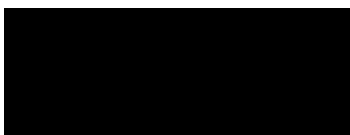
ELIANA DE FÁTIMA DA COSTA LIMA

Tese aprovada em 31 de março de 2023.

Período Letivo: 2022.2



**Profa. Dra. Solange Maria Leder – UFPB
Orientadora**



**Prof. Dr. Roberto Leal Pimentel – UFPB
Examinador Interno**



**Prof. Dr. Felipe Tavares da Silva – UFPB
Examinador Interno**



**Prof. Dr. Aldomar Pedrini – UFRN
Examinador Externo**



**Profa. Dra. Lucila Chebel Labaki – UNICAMP
Examinadora Externa**

**João Pessoa/PB
2023**

Dedico este trabalho àqueles que, como eu, acreditam na ciência e que reconhecem sua importância. Às Universidades públicas e gratuitas do Brasil.

Dedico também aos meus pais, Luiz (*in memoriam*) e Maria da Dores, que me deram a vida e me ensinaram a vivê-la com dignidade. Que, mesmo nas horas em que meus ideais pareciam distantes e inatingíveis, acreditaram em mim. A vocês, meus pais, por natureza, por opção e amor.

AGRADECIMENTOS

Foram cinco anos de doutorado, sendo dois anos e meio convivendo com as angústias da pandemia da COVID-19. Nesse contexto, preciso agradecer a Deus pela minha vida e pela vida daqueles que me acompanham direta e indiretamente; agradecer por estar aqui, escrevendo estas palavras.

A minha querida orientadora, Professora Solange Leder, pelos quase 15 anos de orientação, confiança e amizade. Que, além do constante apoio e dedicação, dados de uma forma generosa durante este trabalho, também representa para mim um modelo referencial de conduta como professora e pesquisadora. A você, meu muito obrigada, com todo meu caminho.

Minha gratidão aos meus pais: Luís, que, infelizmente, já não está entre nós, mas que, se estivesse, estaria, certamente, orgulhoso e muito feliz, e minha mãe, Maria das Dores, que me ensinaram que a humildade, o respeito, a responsabilidade e a confiança são valores que precisamos ter para alcançar a plenitude. A vocês, oferto toda a minha gratidão e Amor!

Ao meu esposo, Maurício, pela paciência, companheirismo e amor. Por tornar meus dias mais alegres e por estar sempre ao meu lado nos momentos decisivos deste caminho, dividindo as dores e as doçuras desta inesquecível etapa de minha vida.

Às minhas irmãs, Elaine e Edjane, pelo companheirismo, pelos momentos de alegria, por sempre estarem ao meu lado e pela compreensão nos momentos em que estive ausente. A Elaine, pela grande ajuda na reta final deste trabalho, quando minhas forças já se esgotavam. À minha querida sobrinha, a pequena Júlia, pelos inúmeros sorrisos e olhares carinhosos que sempre me inspiram a levar a vida com mais alegria e leveza. Sem vocês, tudo seria mais difícil!

Aos amigos do Labcon, com quem, por muitas vezes, dividi as conquistas, alegrias e angústias ao longo da realização deste trabalho, agradeço pela presteza, estudos compartilhados e, sobretudo, pela amizade.

Aos estimados professores membros da banca, Aldomar Pedrini e Roberto Pimentel, pelas pertinentes observações feitas no exame de qualificação. Aos professores Lucila Labaki e Felipe Tavares, por aceitarem fazer parte da banca examinadora deste trabalho.

Ao professor Luiz Bueno e Erivaldo Lopes, do Laboratório de Análise do Trabalho (LAT), pela disponibilidade e preciosa ajuda com a análise estatística.

À Juliene Osias pela grande contribuição prestada na reta final da construção deste trabalho.

À Universidade Federal da Paraíba e ao Instituto Federal da Paraíba pela oportunidade de realização deste trabalho.

À coordenação, ao corpo docente e aos funcionários do PPGECAM, pela dedicação em entregar um ensino público de qualidade.

A todas as pessoas que tive a sorte de conhecer e que, de uma forma ou de outra, contribuíram para minha pesquisa. Elas muito me ensinaram sobre amizade, companheirismo e solidariedade. Acho muito pouco só agradecer, mas não poderia deixar de fazê-lo.

“Por vezes, sentimos que aquilo que fazemos não é, senão, uma gota de água no mar. Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota.”

(Madre Teresa de Calcutá)

RESUMO

LIMA, Eliana de Fátima da Costa. **Vegetação arbórea na simulação computacional da iluminação natural em ambientes internos**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, UFPB, 2023.

A vegetação arbórea é um elemento de difícil inserção na predição da iluminação natural. Para simular um ambiente com árvores, em *softwares* de simulação da luz natural, é necessário o desenvolvimento de modelos tridimensionais que representem todos os elementos intervenientes na reprodução da luz. Idealmente, variáveis, como a altura, a geometria da copa, a quantidade, dimensão e espaçamento das folhas, a dimensão do tronco, os ramos e galhos, os índices de refletância, os índices de opacidade, entre outras variáveis, devem ser reproduzidos no modelo tridimensional. Além disso, a complexa modelagem depende ainda de um minucioso levantamento de todas as variáveis listadas. Assim, esta tese tem o objetivo principal de caracterizar um método, simplificado e passível de reprodução, para levantamento e modelagem da vegetação arbórea na simulação computacional da luz natural. Os dados desta pesquisa são provenientes de duas fontes: medições sob condições de céu real e simulações computacionais da luz natural. Registros de iluminâncias e luminâncias (imagens HDR) compõem o banco de dados da pesquisa. Foram realizadas análises comparativas que buscaram validar os resultados das simulações computacionais, verificando em que medida o modelo 3D computacional da árvore representa adequadamente a árvore utilizada na coleta de campo (céu real). Os principais resultados comparativos entre medições e simulações indicaram correlações fortes a moderadas (Teste de Spearman) em todos os cenários estudados. Observou-se que os erros encontrados a partir dos indicadores estatísticos MBE e RMSE tendem a ser maiores, principalmente nos pontos mais próximos à janela, onde estão expostos a uma quantidade e variabilidade maior de luz. Esse resultado significa que há uma maior dificuldade em prever a iluminância com maior rigor em locais com iluminação excessiva. Observou-se que, estatisticamente, existe uma correlação entre o DGP extraído das imagens HDR e o DGP extraído das simulações, porém fraca. O coeficiente de determinação (R^2) indicou que os resultados são estatisticamente significativos em 47% das observações. Este resultado pode ser explicado, principalmente, devido à entrada direta da luz do sol no espaço em alguns horários, e a consequente alteração da distribuição da iluminância nas superfícies. De modo geral, pôde-se supor que as principais fontes de discrepâncias entre as medições realizadas sob céu real e as simulações computacionais foram: 1) ausência do entorno no modelo computacional; 2) diferenças entre os tipos de céu (céu real e o modelo de céu de Perez utilizado nas simulações); 3) a presença da luz solar direta; 4) diferenças nas características fotométricas dos materiais; 5) escala dos dispositivos utilizados nas medições de campo. Diferenças entre resultados de medições e simulações são esperados na prática da simulação devido às simplificações dos fenômenos luminosos ocorridos, especialmente no caso de simulações computacionais envolvendo elementos tão complexos como copas de árvores. Assim, conclui-se que o método empregado neste estudo pode contribuir para a simulação da permeabilidade da copa à passagem da luz natural.

Palavras-chave: Iluminação natural. Vegetação arbórea. Simulação computacional.

ABSTRACT

LIMA, Eliana de Fátima da Costa. **Arboreal vegetation in the computer simulation of daylighting in indoor environments.** Thesis (Doctorate in Civil and Environmental Engineering) – Post-Graduation Program in Civil and Environmental Engineering, UFPB, 2023.

The arboreal vegetation is an element of difficult insertion in the prediction of daylighting. To simulate an environment with trees, in daylight simulation software, it is necessary to develop three-dimensional models that represent all the elements intervening in the reproduction of light. Ideally, variables such as height, crown geometry, quantity, leaf size and spacing, trunk size, branches and twigs, reflectance indices, opacity indices, among other variables, should be reproduced in the three-dimensional model. In addition, the complex modeling also depends on a thorough survey of all the variables listed. Thus, this thesis has the main objective of characterizing a simplified and reproducible method for surveying and modeling tree vegetation in the computer simulation of daylight. The data for this research comes from two sources: measurements under real sky conditions and computer simulations of daylight. Illuminance and luminance records (HDR images, or High Dynamic Range images) make up the research database. Comparative analyses were performed to validate the results of the computer simulations, verifying to what extent the 3D computer model of the tree adequately represents the tree used in the field collection (real sky). The main comparative results between measurements and simulations indicated strong to moderate correlations (Spearman Correlation) in all scenarios studied. It was observed that the errors found from the statistical indicators MBE (Mean Bias Error) and RMSE (Root Mean Squared Error) tend to be larger, especially at the points closest to the window, where they are exposed to a greater amount and variability of light. This result means that there is a greater difficulty in predicting illuminance more accurately in locations with excessive illuminance. It was observed that statistically there is a correlation between the DGP (Discomfort Glare Probability) extracted from the HDR images and the DGP extracted from the simulations, but weak. The coefficient of determination (R^2) indicated that the results are statistically significant in 47% of the observations. These results were already expected, mainly due to the direct entrance of sunlight into the space at some times, and the consequent alteration of the illuminance distribution on the surfaces. In general, it could be assumed that the main sources of discrepancies between the measurements performed under real sky and the computational simulations were: 1) absence of the surroundings in the computational model; 2) differences between sky types (real sky and the Perez sky model used in the simulations); 3) the presence of direct sunlight; 4) differences in the photometric characteristics of the materials; 5) scale of the devices used in the field measurements. Differences between measurement and simulation results are expected in simulation practice due to the simplifications of the light phenomena occurring, especially in the case of computer simulations involving elements as complex as tree canopies. Thus, it is concluded that the method employed in this study can contribute to the simulation of canopy permeability to the passage of natural light.

Keywords: Daylighting. Arboreal vegetation. Computational simulation.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Distribuição do resultado das pesquisas ao longo dos anos, em função das palavras-chave pesquisadas.....	59
Tabela 2 –	Luminância pontual medida e fator de calibração aplicado a cada imagem HDR.....	110
Tabela 3 –	Iluminância vertical medida e derivadas das imagens HDR com os respectivos erros médios.....	112
Tabela 4 –	Faixas de valores da métrica de conforto visual.....	118
Tabela 5 –	Análise exploratória dos dados de iluminância medidas <i>in loco</i> no ambiente externo – Estimativas de localização.....	125
Tabela 6 –	Análise exploratória dos dados de iluminância interna medidos sob céu real – Estimativas de localização e variabilidade.....	126
Tabela 7 –	Iluminância do pavimento térreo sob céu real – Estimativas de localização.....	129
Tabela 8 –	Iluminância do pavimento superior medida <i>in loco</i> – Estimativas de localização.....	130
Tabela 9 –	Análise exploratória dos dados de iluminância simulada no ambiente externo – Estimativas de localização.....	132
Tabela 10 –	Análise exploratória dos dados de iluminância horizontal interna simulada – Estimativas de localização e variabilidade.....	134
Tabela 11 –	Iluminância (<i>lux</i>) simulada do pavimento térreo – Estimativas de localização.....	136
Tabela 12 –	Iluminância (<i>lux</i>) simulada do pavimento térreo – Estimativas de localização.....	138
Tabela 13 –	Iluminância externa (<i>lux</i>) simulada e medida – Estimativas de localização.....	139
Tabela 14 –	Iluminância horizontal medida e simulada para a orientação norte – Estimativas de localização.....	141
Tabela 15 –	Resultados do teste de Mann-Whitney para a orientação norte.....	142
Tabela 16 –	Iluminância medida e simulada para a orientação sul – Estimativas de localização.....	143

Tabela 17 –	Resultados do teste de Mann-Whitney para a orientação sul.....	143
Tabela 18 –	Iluminância medida e simulada para a orientação leste – Estimativas de localização.....	144
Tabela 19 –	Resultados do teste de Mann-Whitney para a orientação leste.....	145
Tabela 20 –	Iluminância medida e simulada para a orientação oeste – Estimativas de localização.....	146
Tabela 21 –	Resultados do teste de Mann-Whitney para a orientação oeste.....	146
Tabela 22 –	Resultados da correlação de Spearman para as orientações norte e sul.....	147
Tabela 23 –	Resultados da correlação de Spearman para as orientações leste e oeste.....	148
Tabela 24 –	Resultados do RMSE (raiz quadrada do erro médio) e do MBE (erro absoluto médio) para a iluminância horizontal considerando cada ponto de medição/simulação.....	153
Tabela 25 –	Resultados do teste de Man-Whitney para a orientação norte.....	159
Tabela 26 –	Resultados do teste de Man-Whitney para a orientação sul.....	159
Tabela 27 –	Resultados do teste de Man-Whitney para a orientação leste.....	159
Tabela 28 –	Resultados do teste de Man-Whitney para a orientação oeste.....	159
Tabela 29 –	Resultados da regressão logística binária. Variável dependente de referência foi a condição preferível.....	161
Tabela 30 –	Luminâncias das imagens HDR da orientação norte – Estimativas de localização.....	169
Tabela 31 –	Luminâncias das imagens HDR da orientação sul – Estimativas de localização.....	170
Tabela 32 –	Luminâncias das imagens HDR da orientação leste – Estimativas de localização.....	171
Tabela 33 –	Luminâncias das imagens HDR da orientação oeste – Estimativas de localização.....	172
Tabela 34 –	Estimativas de localização dos valores de DGP.....	187

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 –	Artigos selecionados e categorizados por abordagem.....	34
Quadro 2 –	Estudos relacionados e categorizados por técnica utilizada.....	60
Quadro 3 –	Principais vantagens e desvantagens dos sistemas LIDAR para mapeamento de ambientes com a presença de elementos arbóreos.....	62
Quadro 4 –	Faixas de valores da métrica de conforto visual.....	83
Quadro 5 –	Escolha da escala em função do propósito do projeto de iluminação natural.....	88
Quadro 6 –	Dias das medições da iluminância horizontal, com a orientação estabelecida e o tipo de céu predominante.....	99
Quadro 7 –	Equipamentos utilizados para medições da iluminância.....	99
Quadro 8 –	Equipamento e <i>softwares</i> utilizados para a construção e a manipulação de imagens HDR.....	102
Quadro 9 –	Configurações da câmera usada para capturar uma sequência de múltiplas exposições para a fotografia HDR.....	103
Quadro 10 –	Resumo das etapas e comandos inseridos no Radiance.....	103

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Esquema gráfico envolvendo a questão da pesquisa.....	24
Figura 2 –	Estrutura geral da tese.....	28
Figura 3 –	Estrutura conceitual que explica o domínio das árvores urbanas.....	30
Figura 4a –	Serviços ecossistêmicos e desserviços prestados pelo ecossistema arborizado urbano.....	31
Figura 4b –	Fluxograma de análise energética dos serviços ecossistêmicos das árvores de rua.....	31
Figura 5 –	Exemplos de infraestrutura verde urbana e suas contribuições potenciais para a saúde e o bem-estar dos moradores urbanos.....	38
Figura 6 –	Caminhos pelos quais as áreas verdes urbanas podem influenciar na saúde humana.....	39
Figura 7 –	Parâmetros da vegetação que afetam a radiação solar e o vento e, consequentemente, o comportamento térmico.....	46
Figura 8 –	Representação esquemática dos caminhos da luz difusa através da árvore.....	51
Figura 9 –	Intercepção da radiação solar através da copa arbórea.....	54
Figura 10 –	Etapas de seleção e categorização da literatura acadêmica relacionada ao escopo da pesquisa.....	58
Figura 11 –	Fluxograma de identificação e seleção dos artigos para revisão sistemática.....	59
Figura 12 –	Mapa temporal de iluminação.....	81
Figura 13 –	Gráfico resultante de simulação anual do ofuscamento.....	84
Figura 14 –	Fatores de erros mais comuns em modelos físicos reduzidos.....	86
Figura 15 –	Requisitos para a construção do modelo reduzido.....	87
Figura 16 –	Componentes da simulação de luz natural.....	91
Figura 17 –	Fluxograma do processo metodológico.....	94
Figura 18 –	Desenhos esquemáticos da planta e corte do modelo utilizado. Localização dos pontos de medição da iluminância horizontal.....	95
Figura 19 –	À esquerda – Desenho esquemático do bonsai; ao centro – Fotografia bonsai da espécie Buxus; à direita – Proporção da folha do Buxus Harlandi na escala 1:20.....	96
Figura 20 –	Local da realização das medições: a) Visão geral do campo de futebol; b) Vista orientada para nordeste; c) Vista orientada para sudoeste; d) Posicionamento das maquetes; e) Vista orientada para o céu a partir da maquete (visão do céu	

	desobstruído).....	97
Figura 21 –	Imagens da disposição dos modelos no momento das medições da iluminância.....	100
Figura 22 –	Imagens do céu para o dia 22 de fevereiro de 2022 – céu claro.....	101
Figura 23 –	Processo de construção de imagens HDR.....	106
Figura 24 –	Sequência de 15 imagens LDR de exposição múltipla separadas por 1 parada EV.....	107
Figura 25 –	Corte de uma imagem HDR em um quadrado abrangendo a visão circular do olho de peixe.....	109
Figura 26 –	Cena com destaque para o alvo de medição da luminância pontual (cartão cinza)	110
Figura 27 –	Processo de construção do modelo tridimensional do bonsai utilizando o Polycam.....	115
Figura 28 –	Sequência de imagens do modelo 3D do bonsai a partir do aplicativo Polycam.....	116
Figura 29 –	Imagens do modelo 3D do bonsai após ajustes no <i>SketchUp</i>	116
Figura 30 –	Modelo 3D dos cenários com o posicionamento da árvore.....	117
Figura 31 –	Fluxograma das etapas de apresentação dos resultados.....	123
Figura 32 –	Distribuição da iluminância medida sob céu no ambiente externo.....	124
Figura 33 –	Iluminância horizontal medida sob céu real: pavimento térreo.....	125
Figura 34 –	Iluminância horizontal medida sob céu real: pavimento superior.....	126
Figura 35 –	Gráfico QQ com dados de iluminância medidos <i>in loco</i>	127
Figura 36 –	Distribuição da iluminância no pavimento térreo, considerando a situação com a presença da árvore e sem a presença da árvore.....	128
Figura 37 –	Distribuição da iluminância no pavimento superior, considerando a situação com a presença da árvore e sem a presença da árvore.....	128
Figura 38 –	Pavimento térreo: distribuição da iluminância considerando a situação com a presença da árvore e sem a presença da árvore para as quatro orientações.....	129
Figura 39 –	Pavimento superior: distribuição da iluminância medida considerando a situação com a presença da árvore e sem a presença da árvore para as quatro orientações.....	130
Figura 40 –	Distribuição da iluminância horizontal simulada no ambiente externo.....	132
Figura 41 –	Iluminância horizontal simulada: pavimento térreo.....	133
Figura 42 –	Iluminância horizontal simulada: pavimento superior.....	133

Figura 43 –	Gráfico QQ com dados de iluminância horizontal simulada.....	134
Figura 44 –	Frequência da iluminância simulada para cada orientação – pavimento térreo.....	135
Figura 45 –	Pavimento térreo – Distribuição da iluminância simulada considerando a situação com a presença da árvore e sem a presença da árvore para as quatro orientações.....	135
Figura 46 –	Frequência da iluminância simulada para cada orientação – pavimento superior.....	137
Figura 47 –	Pavimento superior – Distribuição da iluminância simulada, considerando a situação com a presença da árvore e sem a presença da árvore para as quatro orientações.....	137
Figura 48 –	Iluminância horizontal externa medida e simulada.....	139
Figura 49 –	Distribuição da densidade da iluminância medida e simulada.....	140
Figura 50 –	Iluminância horizontal medida e simulada – orientação norte.....	141
Figura 51 –	Iluminância horizontal medida e simulada – orientação sul.....	142
Figura 52 –	Iluminância horizontal medida e simulada – orientação leste.....	144
Figura 53 –	Iluminância horizontal medida e simulada – orientação oeste.....	145
Figura 54 –	Correlação entre a iluminância medida e simulada para a orientação norte.....	147
Figura 55 –	Correlação entre a iluminância medida e simulada para a orientação sul.....	147
Figura 56 –	Correlação entre a iluminância medida e simulada para a orientação leste.....	148
Figura 57 –	Correlação entre a iluminância medida e simulada para a orientação oeste.....	148
Figura 58 –	Comportamento da iluminância média medida e simulada para a orientação norte, considerando cada ponto de medição individualmente.....	149
Figura 59 –	Comportamento da iluminância média medida e simulada para a orientação sul, considerando cada ponto de medição individualmente.....	150
Figura 60 –	Comportamento da iluminância média medida e simulada para a orientação leste, considerando cada ponto de medição individualmente.....	151
Figura 61 –	Comportamento da iluminância média medida e simulada para a orientação oeste, considerando cada ponto de medição individualmente.....	152
Figura 62 –	DGP extraído das imagens HDR e das simulações computacionais: orientação norte.....	155
Figura 63 –	DGP extraído das imagens HDR e das simulações computacionais: orientação sul.....	155
Figura 64 –	DGP extraído das imagens HDR e das simulações computacionais: orientação	

	leste.....	156
Figura 65 –	DGP extraído das imagens HDR e das simulações computacionais: orientação oeste.....	157
Figura 66 –	Correlação entre DGP extraído das imagens HDR e DGP extraído das simulações computacionais.....	157
Figura 67 –	Percentuais de redução da iluminância da situação com árvore em relação a situação sem árvore.....	160
Figura 68 –	Curva ROC do modelo de regressão logística binária da classificação da iluminância em preferível (< 3000 lux) e excessiva (> 3000 lux).....	162
Figura 69 –	Frequência de ocorrência da iluminância considerando cada ponto de medição individual para a orientação norte.....	163
Figura 70 –	Frequência de ocorrência da iluminância considerando cada ponto de medição individual para a orientação sul.....	164
Figura 71 –	Frequência de ocorrência da iluminância considerando cada ponto de medição individual para a orientação leste.....	164
Figura 72 –	Frequência de ocorrência da iluminância considerando cada ponto de medição individual para a orientação oeste.....	165
Figura 73 –	Fator de Luz do Dia (FLD) para cada cenário, considerando apenas a condição de céu encoberto.....	166
Figura 74 –	Correlação entre a iluminância vertical medida e a iluminância vertical extraída da imagem HDR.....	167
Figura 75 –	Imagens HDR e mapas e luminância com cores falsas para a orientação norte.....	168
Figura 76 –	Imagens HDR e mapas e luminância com cores falsas para a orientação sul.....	169
Figura 77 –	Imagens HDR e mapas e luminância com cores falsas para a orientação leste.....	171
Figura 78 –	Imagens HDR e mapas e luminância com cores falsas para a orientação oeste.....	172
Figura 79 –	Comparação entre as luminâncias médias dos cenários.....	173
Figura 80 –	Valores de DGP em três momentos do dia e para cada cenário.....	175
Figura 81 –	Exposição Anual à Luz do Sol (ASE) para cada ponto simulado.....	177
Figura 82 –	UDI para cada ponto simulado: orientação norte.....	178
Figura 83 –	UDI para cada ponto simulado: orientação sul.....	178

Figura 84 –	UDI para cada ponto simulado – orientação leste.....	179
Figura 85 –	UDI para cada ponto simulado – orientação oeste.....	179
Figura 86 –	Mapas de iluminância temporal do pavimento térreo com árvore: orientação sul.....	180
Figura 87 –	Mapas de iluminância temporal do pavimento térreo sem árvore – orientação sul.....	181
Figura 88 –	Mapas de probabilidade de ofuscamento temporal – orientação norte.....	182
Figura 89 –	Mapas de probabilidade de ofuscamento temporal – orientação sul.....	183
Figura 90 –	Mapas de probabilidade de ofuscamento temporal – orientação leste.....	184
Figura 91 –	Mapas de probabilidade de ofuscamento temporal – orientação oeste.....	185
Figura 92 –	Distribuição do DGP simulado entre 6:30 e 17:30 durante todo o ano.....	187
Figura 93 –	Mapas e luminância com cores falsas para a orientação norte.....	188
Figura 94 –	Mapas e luminância com cores falsas para a orientação sul.....	189
Figura 95 –	Mapas e luminância com cores falsas para a orientação leste.....	190
Figura 96 –	Mapas e luminância com cores falsas para a orientação oeste.....	191

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	22
1.1	Problemática: tema, problema e objeto.....	22
1.2	Justificativa e relevância do tema proposto.....	24
1.3	Objetivos.....	25
1.4	Resumo da Metodologia Aplicada.....	26
1.5	Estrutura do trabalho.....	27
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	29
2.1	O efeito da vegetação arbórea no ambiente urbano.....	29
2.1.1	PESQUISA E SELEÇÃO DE ESTUDOS.....	33
2.1.2	CUSTOS E VALORAÇÃO MONETÁRIA DAS ÁRVORES URBANAS.....	34
2.1.3	INFRAESTRUTURA VERDE URBANA E SAÚDE HUMANA.....	37
2.1.4	CONFORTO AMBIENTAL E PERCEPÇÃO SOBRE A VEGETAÇÃO ARBÓREA NO AMBIENTE URBANO.....	42
2.1.4.1	Percepção sobre as árvores urbanas.....	42
2.1.4.2	O efeito das árvores urbanas no conforto e bem-estar.....	44
2.1.5	VEGETAÇÃO ARBÓREA URBANA E A ILUMINAÇÃO NATURAL.....	49
2.1.6	CONSIDERAÇÕES SOBRE O TEMA.....	55
2.2	Inserção da vegetação na simulação: técnicas de mapeamento e reconstrução virtual da vegetação.....	56
2.2.1	PESQUISA E SELEÇÃO DE ESTUDOS.....	58
2.2.2	TÉCNICAS DE MAPEAMENTO DAS CARACTERÍSTICAS ESTRUTURAIS DE ÁRVORES.....	60
2.2.2.1	Escaneamento a laser – Tecnologia LiDAR.....	61
2.2.2.1.1	<i>Escaneamento a partir de veículos aéreos não tripulados – ULS.....</i>	<i>62</i>
2.2.2.1.2	<i>Escaneamento a laser a partir do solo – TLS.....</i>	<i>63</i>
2.2.2.2	Fotogrametria.....	66
2.2.2.2.1	<i>Estrutura a partir do movimento (Structure from Motion – SfM).....</i>	<i>66</i>
2.2.3	MÉTODOS DE RECONSTRUÇÃO TRIDIMENSIONAL DE ÁRVORES....	69
2.2.3.1	Modelagem Funcional-Estrutural de Plantas – FSP.....	70
2.2.4	CONSIDERAÇÕES SOBRE O TEMA.....	72
2.3	Métricas e métodos de análise da iluminação natural.....	74

2.3.1	MÉTRICAS PARA A AVALIAÇÃO DA ILUMINAÇÃO NATURAL.....	74
2.3.1.1	Fator de Luz do Dia.....	75
2.3.1.2	Modelagem de Iluminação Natural Baseada no Clima.....	76
2.3.1.2.1	<i>Autonomia da Luz Natural.....</i>	77
2.3.1.2.2	<i>Autonomia Espacial da Luz Natural.....</i>	77
2.3.1.2.3	<i>Autonomia Contínua da Luz Natural.....</i>	78
2.3.1.2.4	<i>Autonomia Máxima de Luz Natural.....</i>	78
2.3.1.2.5	<i>Autonomia de Luz Natural Mínima.....</i>	79
2.3.1.2.6	<i>Iluminância Útil da Luz do Dia.....</i>	79
2.3.1.2.7	<i>Exposição Anual à Luz do Sol.....</i>	80
2.3.1.2.8	<i>Mapa Temporal de Iluminação.....</i>	81
2.3.1.3	Parâmetros de avaliação do ofuscamento.....	81
2.3.1.3.1	<i>Probabilidade de ofuscamento (DGP).....</i>	83
2.3.2	MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA ILUMINAÇÃO NATURAL.....	84
2.3.2.1	Cálculos manuais.....	84
2.3.2.2	Modelo físico em escala reduzida.....	85
2.3.2.3	Simulações computacionais.....	89
2.3.3	MAPEAMENTO DA LUMINÂNCIA ATRAVÉS DE IMAGENS HDR.....	92
3	MÉTODOS DE PESQUISA.....	94
3.1	Definição e caracterização do modelo em escala reduzida.....	94
3.2	Medições da luz natural sob céu real.....	98
3.2.1	LEVANTAMENTO DA ILUMINÂNCIA HORIZONTAL.....	98
3.2.1.1	Definição das métricas para análise da disponibilidade e distribuição da iluminância horizontal.....	101
3.2.2	MAPEAMENTO DA LUMINÂNCIA ATRAVÉS DE IMAGENS HDR.....	102
3.2.2.1	Procedimentos gerais.....	103
3.2.2.1.1	<i>Determinação das coordenadas e do ângulo de visão real da lente olho de peixe.....</i>	103
3.2.2.1.2	<i>Determinação da função de resposta.....</i>	104
3.2.2.1.3	<i>Determinação da projeção e distorção da lente.....</i>	104
3.2.2.2	Procedimento para a construção da imagem HDR.....	105
3.2.2.2.1	<i>Captura e seleção de imagens LDR com múltiplas exposições.....</i>	106
3.2.2.2.2	<i>Fusão de exposições.....</i>	108
3.2.2.3	Processo de calibração de imagem HDR.....	108

3.2.2.4	Ajuste fotométrico.....	110
3.2.2.5	Edição de cabeçalho de imagem HDR.....	111
3.2.2.6	Verificação de validade.....	111
3.2.3	DEFINIÇÃO DA MÉTRICA DE OFUSCAMENTO.....	113
3.3	Construção do modelo arbóreo computacional simplificado.....	114
3.4	Simulações computacionais.....	117
3.5	Análises dos resultados.....	119
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	123
4.1	Análise descritiva dos resultados das medições e simulações.....	124
4.1.1	MEDIÇÕES SOB CÉU REAL DA ILUMINÂNCIA HORIZONTAL.....	124
4.1.2	SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS.....	131
4.2	Análise comparativa: medição versus simulação.....	138
4.2.1	ILUMINÂNCIA HORIZONTAL.....	139
4.2.2	PROBABILIDADE DE OFUSCAMENTO – DGP.....	154
4.3	Impacto da vegetação arbórea na iluminação natural.....	158
4.3.1	ANÁLISE DA ILUMINAÇÃO NATURAL, CONSIDERANDO MEDIÇÕES SOB CÉU REAL.....	158
4.3.1.1	Influência de algumas variáveis nos níveis de iluminância.....	160
4.3.1.2	Desempenho lumínico segundo as métricas das, ASE, UDI e DF.....	162
4.3.1.3	Luminância e imagens de alta faixa dinâmica.....	166
4.3.1.3.1	<i>Probabilidade e ofuscamento – DGP.....</i>	<i>174</i>
4.3.2	ANÁLISE ANUAL DA ILUMINÂNCIA NATURAL – SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS.....	176
4.3.2.1	Disponibilidade de iluminação natural – Iluminância horizontal.....	176
4.3.2.2	Probabilidade de ofuscamento – DGP.....	182
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	192
5.1	Quanto às análises descritivas.....	192
5.2	Quanto às análises comparativas.....	193
5.3	Quanto à análise do impacto da vegetação arbórea na luz natural.....	195
	REFERÊNCIAS.....	198
	APÊNDICE A.....	223
	APÊNDICE B.....	255
	APÊNDICE C.....	256

1 INTRODUÇÃO

1.1 Problemática: tema, problema e objeto

O efeito da luz natural em um ambiente construído é o resultado da confluência de características físicas – diversidade de superfícies do ambiente iluminado – com a fonte de luz natural específica da região – o sol e o céu. Os padrões que enxergamos ao nosso redor em diferentes escalas da cidade – bairros, ruas, edifício – consistem no resultado dessa complexa interação entre as características físicas e da fonte de luz.

Os fatores que influenciam a disponibilidade da luz natural são diversos. Dentre eles, podemos destacar a obstrução do entorno, variável de grande impacto em áreas densamente urbanizadas. Mesmo em áreas pouco urbanizadas, elementos naturais, como a vegetação arbórea, podem provocar uma obstrução considerável, que se traduz na alteração da quantidade de luz natural disponível no interior dos ambientes (HOPKINSON *et al.*, 1975).

A arborização urbana pode trazer proteção solar para os edifícios, reduzindo o consumo de energia para o condicionamento térmico interno, devido ao seu efeito de sombra. Além disso, as árvores urbanas são capazes de reduzir o processo de erosão, atuam no controle da velocidade do vento, mitigam a poluição do ar e ainda agem como barreira natural acústica, como observado em diversas pesquisas já desenvolvidas (SPIEKERMANN *et al.*, 2022; VAILSHERY *et al.*, 2013; CALQUÍN *et al.*, 2019). A arborização urbana ainda propicia *habitat* para algumas espécies da vida selvagem (LAFORTEZZA *et al.*, 2009; TSUCHIYA; OKURO; TAKEUCHI, 2013). Somados a estes benefícios, as árvores contribuem diretamente para o aumento dos laços de vizinhança, despertando o senso de comunidade (KEARNEY, 2006 e MAAS *et al.*, 2009). Estes benefícios atuam diretamente na melhora da saúde mental e física das pessoas (HARTIG *et al.*, 2010; NILSSON *et al.*, 2011). Ao mesmo tempo, a vegetação arbórea tem apelo estético considerável (HERZOG *et al.*, 2000; KAPLAN; TAŞKIN; ÖNENÇ, 2006; ROGGE; NEVENS; GULINCK, 2007), com muitas associações positivas dentro de nossa cultura. Getz; Karow e Kielbaso (1982) enfatizam a relevância considerável que as árvores têm para as pessoas na escolha de uma residência.

As árvores distribuídas em ambientes urbanos também são eficazes na redução da radiação UV em suas proximidades (HEISLER; GRANT, 2000; YANG; MILLER; MONTGOMERY, 1993; DIFFEY; DIFFEY, 2002; GIES *et al.*, 2007; GRANT *et al.*, 2003; QI *et al.*, 2010). Considerando que a exposição humana à radiação solar ultravioleta (UV) é responsável por vários efeitos adversos à saúde (AGAR *et al.*, 2004; LAVKER *et al.*, 1995;

ULLRICH; NGHIEM; KHASKINA, 2007; DE GRUIJL; VAN DER LEUN, 2000), a importância de proteger a população contra os efeitos causados pela radiação UV é real e tem gerado implicações profundas na saúde pública em todo o mundo. A exposição humana à radiação solar UV depende da irradiância UV do ambiente e é influenciada pela refletividade das superfícies. Sliney (1986) observou que a refletância da areia e do concreto são, de longe, os maiores contribuintes para a exposição aos raios UV, quando comparados com as refletâncias da vegetação. Por esse motivo, a exposição à radiação UV ocorre rotineiramente e de maneira imperceptível, principalmente nas grandes cidades, influenciada pela estrutura urbana.

Essa crescente conscientização sobre o impacto das árvores na escala urbana e seus benefícios para a economia de energia na escala de construção, estudada por Balogun, Morakinyo e Adegun (2014), vem resultando em largas pesquisas no mundo inteiro, pressionando pela floresta urbana e pelo esverdeamento urbano (GE *et al.*, 2023; WANG *et al.*, 2019; Ko 2018; WANG *et al.*, 2016). Esse impulso também influencia outra qualidade essencial do meio ambiente – a iluminação natural, um aspecto menos estudado das árvores em relação às edificações e ao planejamento urbano.

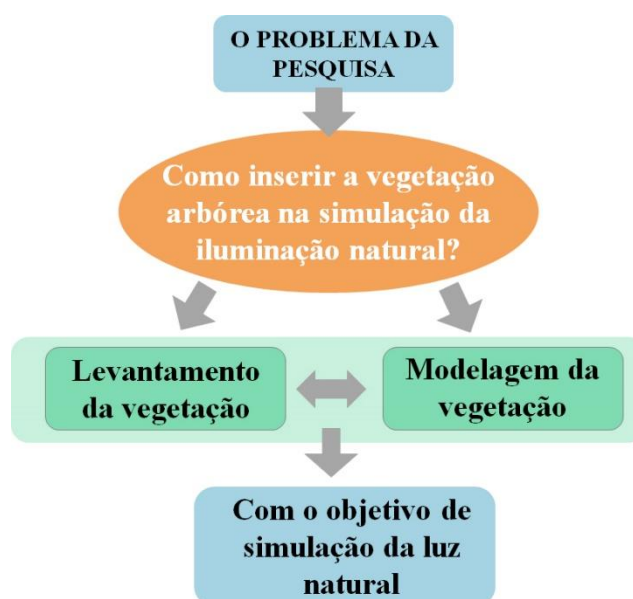
Coder (1996) explica a capacidade da vegetação urbana na redução do brilho excessivo vindo da luz natural. Ele afirma que as árvores ajudam a controlar a dispersão e a intensidade da luz, além de modificar os comprimentos de onda predominantes de sua localização. Desta forma, a vegetação arbórea pode melhorar a qualidade da luz que incide através das aberturas, reduzindo a intensidade da componente direta do sol, bem como o brilho vindo do céu. Al-sallal e Al-raïs (2012) também afirmam que a qualidade da luz do dia é alcançada através do bloqueio da luz solar direta e o incremento da luz solar refletida. Nesse aspecto, a luz natural que entra através das aberturas pode ser filtrada e suavizada pela presença de vegetação, proporcionando maior conforto visual e bem-estar aos usuários.

Por outro lado, a vegetação é um elemento de difícil inserção no projeto da iluminação natural. Considerando, por exemplo, a simulação computacional, todos os elementos intervenientes na reprodução da luz devem ser modelados tridimensionalmente. Para simular um ambiente com árvores, em *softwares* de simulação da luz natural, é necessário o desenvolvimento de modelos tridimensionais que representem a vegetação em análise. Idealmente, variáveis, como a altura, a geometria da copa, a quantidade, dimensão e espaçamento das folhas, dimensão do tronco, ramos e galhos, índice de refletância, índice de opacidade, entre outras, devem ser reproduzidas no modelo tridimensional. Contudo, essa modelagem é impraticável, devido à complexidade de todas as variáveis envolvidas no processo, como também a sobrecarga do modelo. Tregenza e Wilson (2011) ressaltam que as

características físicas das copas de árvores mudam entre espécies e com o tempo, e um modelo de copa, incluindo esses detalhes, aumenta o tempo computacional. Tudo isso torna desafiador incorporar árvores nos cálculos da luz do dia.

Diante do exposto, esta pesquisa é orientada pela seguinte questão: como inserir a vegetação arbórea na simulação computacional da iluminação natural? Para se obter uma resposta, torna-se necessário considerar o processo de levantamento e modelagem dessa vegetação, que impactará diretamente na modelagem da luz natural (Figura 1).

Figura 1 – Esquema gráfico envolvendo a questão da pesquisa



Fonte: dados da pesquisa, 2023.

Desta forma, o objeto de estudo é o impacto da vegetação arbórea na iluminação natural de ambientes internos.

1.2 Justificativa e relevância do tema proposto

É reconhecido e citado em diversos estudos (YOSHIMURA *et al.*, 2010; TOOKE *et al.*, 2011; CANTÓN; CORTEGOSO; DE ROSA, 1994; SINOQUET *et al.*, 2007; NA *et al.*, 2014; BERRY; LIVESLEY; AYE, 2013; CANTÓN; CORTEGOSO; DE ROSA, 1994; SINOQUET *et al.*, 2007; NA *et al.*, 2014), quando mencionam que a estrutura da copa das árvores (dimensões, densidade, configuração dos galhos, tamanho e propriedades espectrais das folhas) influenciam na exposição à radiação e que estas mesmas características também interferem

diretamente no desempenho da iluminação dos ambientes internos.

As árvores criam um complexo campo tridimensional de luz, transmitindo, espalhando e atenuando a luz. O tamanho, a forma, a cor e a permeabilidade de uma copa de árvore próxima a um edifício afetam a quantidade e a qualidade da luz recebida nos espaços. Conforme afirmam Tregenza e Wilson (2011), árvores que têm copas mais escuras e mais densas transmitem e refletem menos luz, enquanto copas mais claras e esparsas transmitem e refletem mais luz. As copas arbóreas também melhoram a visão, criam padrões de luz e podem ajudar a manter o conforto visual particularmente em climas quentes e ensolarados, como é o caso de grande parte do território brasileiro, onde o controle da luz direta é a chave para um bom projeto de iluminação natural.

A prática atual de simulação da luz natural não inclui árvores quando se consideram obstruções externas ou as modela como superfícies transparentes com uma transmissão visual presumida de 30% (IBARRA e REINHART, 2009). O comitê de métricas de luz do dia da IES (Illuminating Engineering Society) recomenda modelar árvores como volumes primitivos (cones, cilindros e esferas), com uma reflexão de 20% quando a reflexão da folha é desconhecida.

O conhecimento sobre as propriedades transmissivas diretas e difusas, bem como os padrões de sombra criados pela luz que passa pelas árvores são, em sua maioria, quantidades desconhecidas. Medidas cuidadosas e métodos generativos são necessários para desenvolver modelos de árvores realistas para fins de simulação (BALAKRISHNAN, 2019).

A modelagem da luz através de copas de árvores tem sido abordada de diferentes maneiras e para várias aplicações, como na ciência florestal, jogos computacionais, realidade virtual, renderizações arquitetônicas, dentre outros. Os requisitos exigidos de cada um desses campos variam de acordo com os resultados desejados. A exemplo, as renderizações exigem uma representação visual precisa da própria árvore, mas não necessariamente a quantidade de luz transmitida. Porém, para simulações da luz natural, a representação real da árvore não é significativa, apenas a quantidade e a distribuição de luz passando e refletida por sua copa.

1.3 Objetivos

Como resposta ao problema da pesquisa, o objetivo geral deste trabalho de tese é caracterizar um método para levantamento e modelagem da vegetação arbórea na simulação computacional da luz natural.

São objetivos específicos:

- 1) Propor um método para monitoramento, sob céu real, da iluminação natural em ambiente interno, com a presença de árvore no exterior, que possa ser reproduzido em ambiente virtual;
- 2) Analisar a influência da vegetação arbórea no desempenho luminoso de ambiente interno, considerando variáveis, como orientação, pavimento e período do dia;
- 3) Reproduzir, no ambiente virtual, um modelo de ambiente com árvore monitorado, realizar a simulação da iluminação natural desse modelo e analisar, comparativamente, influência da vegetação arbórea no desempenho luminoso de ambiente interno.

1.4 Resumo da Metodologia Aplicada

Para atingir os objetivos desta pesquisa, diversas etapas de trabalho e diferentes instrumentos e procedimentos de coletas de dados foram necessários. Sendo assim, o método empregado nesta pesquisa consiste nas etapas seguintes.

1 - Definição e caracterização do modelo em escala reduzida da edificação e da árvore – Como parâmetro de análise do impacto da vegetação arbórea na iluminação natural de ambientes internos, foi construído um modelo físico em escala reduzida com uma configuração experimental. O modelo simula uma configuração de dois ambientes em pavimentos distintos. Para representar a vegetação arbórea, utilizou-se um bonsai.

2 - Medições da iluminância sob céu real – Uma das principais variáveis analisadas neste trabalho é a iluminância observada no interior dos ambientes do modelo edificado em estudo. Desta forma, foram realizadas medições de referência do nível de iluminância horizontal em quatro pontos distribuídos no interior dos ambientes, considerando a presença ou não do modelo físico de árvore próximo à abertura (janela). Esses dados foram tomados como base para posterior validação de simulações computacionais.

3 - Construção de imagens HDR para mapeamento da luminância – A construção das imagens HDR foi realizada a partir de um conjunto de imagens LDR capturadas sob céu real. As imagens HDR permitiram apresentações gráficas de mapas de luminância das cenas estudadas, como também a verificação da probabilidade de ofuscamento.

4 - Reprodução do modelo arbóreo computacional simplificado – Para a realização das simulações computacionais, foi necessário fazer a reconstrução tridimensional do modelo arbóreo utilizado nas medições (o bonsai). Para tanto, fez-se uso de um aplicativo de

escaneamento 3D para dispositivos móveis (Polycam), que produz modelos virtuais detalhados por meio da fotogrametria.

5 - Simulações computacionais – A fim de validar o modelo 3D de árvore desenvolvido, foi necessária a utilização de simulações computacionais da luz natural, para posterior comparação com dados obtidos com as medições de campo. Nesta etapa, as condições de iluminação natural nos cenários estudados foram verificadas através de métricas baseadas no clima, por meio da ferramenta ClimateStudio

6 - Análises comparativas entre medições e simulações – Os dados desta pesquisa são provenientes de duas fontes: medições sob condições de céu real e simulações computacionais da luz natural. As análises comparativas buscaram validar os resultados das simulações computacionais, verificando em que medida o modelo 3D computacional da árvore representa adequadamente a árvore real utilizada na etapa da coleta de campo.

1.5 Estrutura do trabalho

Esta tese está estruturada em 5 partes, conforme a descrição a seguir:

Parte I – Composta pela introdução que delimita o tema da pesquisa e aborda aspectos relevantes para situar o tema, conforme os seguintes itens: colocação do problema, justificativa e relevância do tema proposto, objetivos gerais e específicos e uma visão geral da metodologia aplicada.

Parte II – Apresenta revisão bibliográfica e fundamentação teórica. Esta parte subdivide-se em três tópicos principais: o primeiro aborda o efeito das árvores urbanas, considerando os custos e a valoração monetária; a saúde e o bem-estar humano; conforto ambiental e percepção e a iluminação natural. O segundo revisa as técnicas e métodos de medição e modelagem 3D da vegetação arbórea. E o último trata sobre as métricas e métodos de análise da iluminação natural.

Parte III – Aborda o método da pesquisa com descrição dos procedimentos adotados e equipamentos utilizados. O método está dividido em cinco partes principais: definição e caracterização do modelo em escala reduzida da edificação e da árvore; medições da iluminância sob céu real; construção do modelo arbóreo computacional simplificado; simulações computacionais e, por último, análises comparativas entre medições e simulações.

Parte IV – Apresenta os resultados da pesquisa, estruturada em três seções principais: análise do impacto da vegetação arbórea na disponibilidade e na qualidade da iluminação natural, simulações computacionais e análises comparativas. Os resultados são analisados de

acordo com as duas principais fontes de dados obtidos: iluminância horizontal e mapeamento das luminâncias.

Parte V – Apresenta as conclusões gerais sobre a pesquisa, apontando as limitações do trabalho e sugestões de temas para pesquisas futuras que visam dar continuidade ao trabalho.

A Figura 2 apresenta um esquema das etapas do desenvolvimento deste trabalho.

Figura 2 – Estrutura geral da tese



Fonte: dados da pesquisa, 2023.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 O efeito da vegetação arbórea no ambiente urbano

Nesta seção, os estudos pesquisados e revisados sobre a arborização urbana são baseados, principalmente, no seu efeito sobre a iluminação natural do ambiente urbano, como também nos benefícios à saúde, no conforto ambiental, na percepção das pessoas e no planejamento. Desta forma, o principal objetivo é observar e rastrear estudos e experimentos recentes que abordem os principais efeitos que a vegetação, principalmente a arbórea, exerce no ambiente urbano.

Uma árvore urbana é uma vegetação lenhosa perene, tendo, normalmente, um único caule ou tronco e, geralmente, uma copa distinta, crescendo a uma altura considerável e apresentando ramos laterais a alguma altura do chão. As árvores urbanas incluem árvores individuais, bem como aquelas que ocorrem em povoamentos, manchas e grupos dentro de espaços verdes acessíveis ao público (ROY *et al.*, 2012).

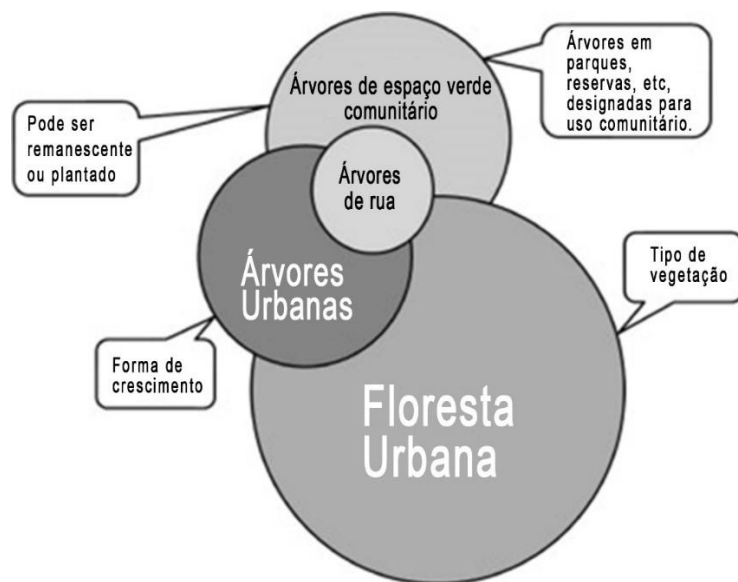
Os serviços ecossistêmicos (ou serviços ambientais) correspondem aos benefícios da natureza obtidos pela sociedade, de modo direto ou indireto, visando à sustentabilidade da vida no planeta e o combate às Mudanças Climáticas (MRNDES *et al.*, 21021). Termos como: Floresta Urbana, Serviços Ecossistêmicos, Infraestrutura Verde e Soluções baseadas na Natureza são alguns dos termos utilizados nas pesquisas científicas sobre esta temática. Embora utilizados, muitas vezes, como sinônimos, são conceitos distintos, que derivam da Floresta Urbana.

A Infraestrutura Verde remete ao padrão espacial e à conectividade da vegetação urbana com o ambiente natural. Os Serviços Ecossistêmicos dizem respeito às funções naturais em que se beneficiam natureza e humanos, e as Soluções baseadas na Natureza, por sua vez, às aplicações para resolver problemas ambientais urbanos e desafios sociais, políticos e ecológicos (ESCOBEDO *et al.*, 2019).

A definição de floresta urbana também pode ser entendida como “a soma de todas as árvores, arbustos, gramados e solos permeáveis urbanos localizados em ecossistemas altamente alterados e extremamente complexos onde os humanos são os principais condutores de seus tipos, quantidades e distribuição” (ESCOBEDO *et al.*, 2011). Assim, segundo Randrup *et al.* (2005), as árvores urbanas podem ser entendidas como um subconjunto das florestas urbanas, porque estas não são apenas a soma das árvores urbanas, mas também incluem arbustos e grama. A Figura 3, extraída de Roy *et al.* (2012), representa, de forma esquemática, a estrutura

conceitual que explica o domínio das árvores urbanas.

Figura 3 – Estrutura conceitual que explica o domínio das árvores urbanas



Fonte: adaptado de Roy et al. (2012)

As árvores das ruas são o componente mais importante das infraestruturas verdes urbanas, e o plantio de árvores nas ruas cria espaços públicos dinâmicos e interessantes dentro do ambiente construído (SHAH *et al.*, 2022). Nos últimos 30 anos, o papel da arborização das ruas mudou de ornamentação e embelezamento para prestação de outros serviços (SEAMANS, 2013). Além disso, a principal característica das árvores é sua assimilação com a infraestrutura cinza urbana (por exemplo, a rede de transporte), conforme mostrado na Figura 4a, a qual também apresenta alguns serviços ecossistêmicos, como absorção de CO₂, absorção de poluição do ar, redução de ruído e resfriamento e desserviços, como emissões de compostos orgânicos voláteis e danos à infraestrutura que são produzidos pelas árvores das ruas.

A Figura 4b mostra o diagrama do sistema dos serviços ecossistêmicos de uma árvore de rua. Do lado esquerdo para a direita, estão os recursos renováveis (sol, chuva, vento) que conduzem a fotossíntese. As árvores das ruas têm a capacidade de purificar os poluentes do ar e da água por meio de vários processos biológicos, químicos e físicos, que beneficiam a saúde humana e a qualidade de todo o ecossistema. De cima para baixo, a precipitação e o uso de água para irrigação artificial são as principais fontes de água.

A evaporação da água (também proveniente das precipitações) e a transpiração das árvores têm a função de regular o microclima, proporcionando o resfriamento. Da escala micro

à macro, as árvores nas ruas também desempenham um papel vital na regulação do microclima por meio do sombreamento, redução do ruído e da poluição e geração de informações (culturais, educacionais e de biodiversidade). Além disso, resíduos verdes, como as folhas das árvores, podem passar por tratamento de reciclagem para compostagem e produção de bioenergia. A Figura 4 também representa o que as pessoas percebem como aspectos negativos da arborização urbana, conhecidos como desserviços.

Figura 4a – Serviços ecossistêmicos e desserviços prestados pelo ecossistema arborizado urbano

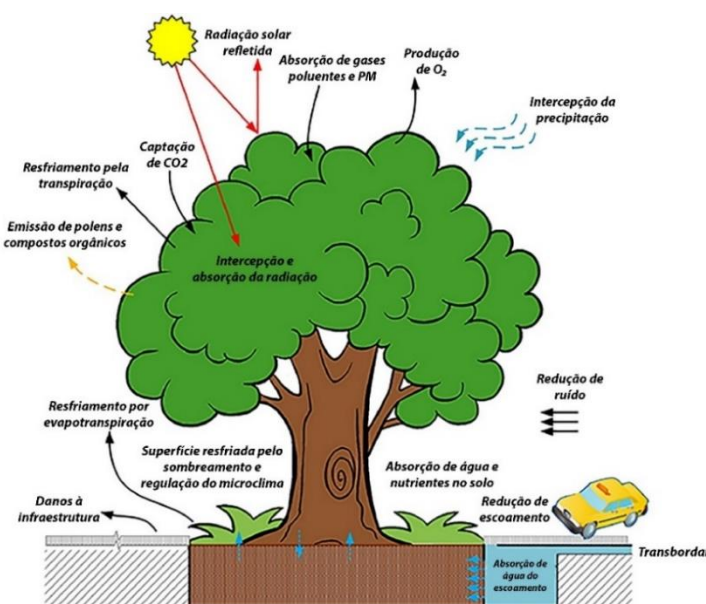
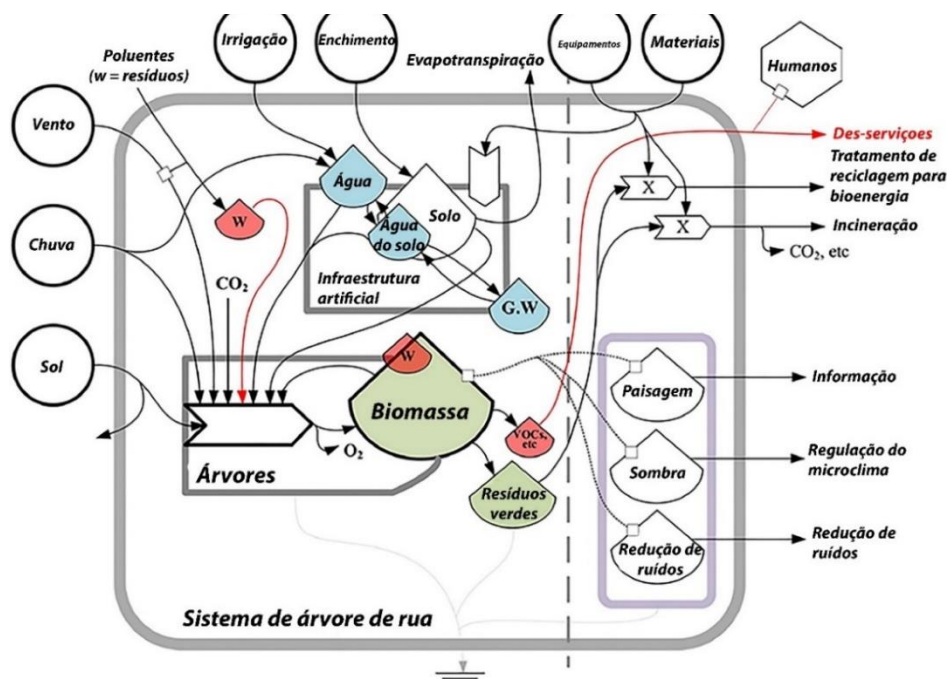


Figura 4b – Fluxograma de análise energética dos serviços ecossistêmicos das árvores de rua



Fonte: extraído e adaptado de Shah *et al.* (2022).

Nas últimas décadas, vários estudos vêm demonstrando que a presença de árvores nas cidades é fundamental para minimizar os efeitos da densificação urbana sem precedentes que o planeta está experimentando (DWYER *et al.*, 1991; SANESI e CHIARELLO, 2006; SOARES *et al.*, 2011; GILLNER *et al.*, 2015; GERSTENBERG e HOFMANN, 2016; LO *et al.*, 2017; DÜMPELMANN, 2020). Prevê-se que as áreas urbanas absorverão a maior parte do crescimento populacional projetado de até 3,2 bilhões de pessoas até 2100. Em 2030, uma em cada três pessoas viverá em cidades com, pelo menos, meio milhão de habitantes (Nações Unidas, 2018).

Dümpelmann (2020) afirma que o papel das árvores e florestas urbanas na urbanização futura e nas estratégias de adaptação ao clima em escala municipal afetará não apenas o bem-estar dos residentes urbanos, mas também a saúde do clima global. Projetos urbanos que trabalhem com as condições ambientais – e não contra elas – que integrem uma infraestrutura verde equitativa, serão cruciais neste momento.

É desejável que as áreas verdes, no interior das cidades, e seus serviços ecossistêmicos sejam distribuídos de forma que favoreçam também os setores mais vulneráveis, e não como ocorrem atualmente, concentrando-se em áreas ricas, nas quais bens e serviços são “comodificados” pelo poder público, visando à especulação imobiliária (ROMERO; MENDES, 2020, *apud* MENDES *et al.*, 2021).

A cidade de Vancouver, no Canadá, por exemplo, conseguiu se tornar a mais sustentável do mundo, com expressivos investimentos em áreas verdes e arborização urbana, por meio de uma política pública adotada em julho de 2011, denominada Greenest City 2020 Action Plan (GCAP), a qual aproximou seus habitantes de alguma área verde em menos de 10 minutos a pé (AFFOLDERBACH; SCHULZ, 2017).

Neste sentido, Manaus, no Estado do Amazonas, é um dos exemplos no Brasil. A cidade possui entre duas a três árvores urbanas por habitante (MENDES, 2021), mais do que o dobro sugerido pela Sociedade Brasileira da Arborização Urbana (SBAU, 1996), de, no mínimo, uma árvore para cada cinco habitantes, ou seja, o equivalente a 15 m² de cobertura arbórea por habitante.

As árvores urbanas, devido às mudanças sazonais e ao seu tamanho, forma e cor, são os elementos mais proeminentes da natureza urbana. Seus benefícios e usos variam de benefícios psicológicos e estéticos intangíveis à melhoria do clima urbano. Historicamente, os principais benefícios das árvores urbanas estão relacionados aos benefícios à saúde, estéticos e recreativos (TYRVÄINEN *et al.*, 2005). Ainda segundo estes autores, as árvores também contribuem para uma paisagem urbana atraente e verde, e assim comunicam a imagem de uma cidade positiva

voltada para a natureza. Indiretamente, as árvores urbanas podem promover o turismo e aumentar o desenvolvimento econômico. No nível local, elas contribuem para a qualidade da habitação e dos ambientes de trabalho, e seus benefícios se refletem nos valores das propriedades.

Mullaney *et al.* (2015) afirmam que os benefícios proporcionados pelas árvores ou florestas urbanas são normalmente classificados como ambientais (BACHIR *et al.*, 2021; ZHAO *et al.*, 2021), econômicos (PANDIT *et al.*, 2012; PANDIT *et al.*, 2013) ou sociais (NOWAK e DWYER, 2007; KUO e SULLIVAN, 2001; VAN DILLEN, *et al.*, 2012), embora alguns benefícios abranjam mais de uma categoria.

A presença de vegetação no entorno do ambiente construído causa sombreamento, que pode atenuar significativamente a radiação solar, reduzindo a intensidade da componente direta do sol, bem como o brilho vindo do céu. Os diversos elementos da vegetação, como folhas, ramos e troncos, podem filtrar e suavizar a luz (AL-SALLAL; AL-RAIS, 2013). A vegetação em excesso, entretanto, pode reduzir o acesso solar nas edificações, interferindo, entre outros aspectos, no desempenho da iluminação luz natural. Por outro lado, elementos verdes podem atuar como um sistema de proteção solar.

2.1.1 PESQUISA E SELEÇÃO DE ESTUDOS

Para o desenvolvimento deste capítulo, foi realizada uma busca sistemática em banco de dados (Science Direct, Google Scholar), usando termos de busca predefinidos, que foram formulados para encontrar artigos com foco no efeito das árvores no espaço e nos residentes urbanos. Combinou-se uma série de termos específicos que englobassem o tema abordado, a saber: “urban trees”, “green infrastructure”, “daylighting”, “influences”, “environmental comfort”, “human health”, “human well being”, “people perception”, “tree costs” e “economic value”

Na plataforma do Science Direct, não foi restringida a data de publicação dos artigos; para o Google Scholar, foram utilizados os primeiros 20 resultados, classificados por relevância. Os critérios de inclusão utilizados na pesquisa foram: 1) árvores urbanas ou estrutura verde urbana como objeto de pesquisa; 2) trabalhos que apresentaram o tema da arborização urbana correlacionado com temas, como a saúde, a percepção humana, o conforto ambiental, a iluminação natural e custos econômicos; 3) artigos publicados em periódicos; 4) artigos em inglês, espanhol ou português.

Os artigos que apresentaram os termos pesquisados em seu título, resumo ou palavras-

chave foram classificados por ano da publicação. A busca no banco de dados foi realizada entre julho e agosto de 2021 e revelou 358 artigos da Science Direct e 228 artigos do Google Scholar, totalizando 586 artigos. Três etapas de seleção foram realizadas: revisão do título, revisão do resumo e revisão do texto completo. No total, foram identificados, inicialmente, 436 artigos não repetitivos, dos quais foram selecionados 64 artigos. Na etapa seguinte, os textos completos dos 34 artigos foram analisados para identificar e agrupar manualmente por abordagem do estudo. Dentre outras, foram identificadas cinco abordagens principais de interesse, conforme Quadro 1 abaixo.

Quadro 1 – Artigos selecionados e categorizados por abordagem

FOCO	ESTUDOS SELECIONADOS
Saúde humana	James <i>et al.</i> (2015); Persson <i>et al.</i> (2018); Pereira <i>et al.</i> (2013); Takano <i>et al.</i> (2002); Rao <i>et al.</i> (2014); Nowak <i>et al.</i> (2014); Hu <i>et al.</i> (2008); Chen <i>et al.</i> (2014); Gascon <i>et al.</i> (2018); Beyer <i>et al.</i> (2014); Song <i>et al.</i> (2019); Mukherjee <i>et al.</i> (2017); Berg, (2015); Kardan <i>et al.</i> (2015); Mitchell e Popham (2008).
Conforto, bem-estar e percepção	Lai <i>et al.</i> (2019); O'Malley <i>et al.</i> (2015); Ng <i>et al.</i> (2012); Abreu-Harbach <i>et al.</i> (2015); Hami <i>et al.</i> (2019); Teshnehdel <i>et al.</i> (2020); Mohammad <i>et al.</i> , (2021); Azcarate <i>et al.</i> (2021); Lam <i>et al.</i> , (2020); Chen <i>et al.</i> (2021); Chaiyakul (2004); Villalba <i>et al.</i> (2014). Escobedo <i>et al.</i> (2011); Flannigan (2005); Schroeder <i>et al.</i> (2006); Weber <i>et al.</i> (2014); Davis e Jones (2014); Fernandes <i>et al.</i> (2019); Gerstenberg e Hofmann (2016); Ng <i>et al.</i> (2015); Buccolieri <i>et al.</i> (2011); Vos <i>et al.</i> (2012); Amorim <i>et al.</i> (2013); Janhäll <i>et al.</i> (2015); Abhijith <i>et al.</i> (2017); Guo <i>et al.</i> (2021); Camacho-Cervantes e Schondube (2014); Monteiro <i>et al.</i> (2013)
Benefícios e custos econômicos das árvores urbanas	Feng e tan (2017); Jim, (2017); Balensiefer e Wiecheteck (1985); Vogt <i>et al.</i> (2015); Moore (2009); Pandit <i>et al.</i> (2012); Mullaney <i>et al.</i> (2015); Pandit e Laband (2010); Zhang <i>et al.</i> (2012); Biondi e Althaus (2005); McPherson e Simpson (2002)
A vegetação arbórea e iluminação natural	Yates e McKennan (1989); Hongbing <i>et al.</i> (2010); Chaiyakul (2004); Córlica e Pattini (2012); Al-Sallal (2009); Durante e Nogueira (2013); Al-Sallal (2007); Al-Sallal e Al-Rais (2013); Villalba e Pattini (2014).

Fonte: dados da pesquisa, 2023.

2.1.2 CUSTOS E VALORAÇÃO MONETÁRIA DAS ÁRVORES URBANAS

O maior componente da vegetação urbana na maioria das cidades continua sendo as árvores que crescem nas margens das estradas, parques, jardins, manchas de floresta remanescente e, cada vez mais, também em edifícios (FENG e TAN, 2017; JIM, 2017). Compreender os benefícios proporcionados pelas árvores urbanas é importante para justificar o investimento e melhorar o manejo. As árvores desempenham simultaneamente várias funções essenciais à vida humana, melhorando notadamente as condições do meio

urbano (BALENSIEFER; WIECHETECK, 1985). Como já revisado neste capítulo, a arborização urbana proporciona benefícios à saúde humana, conforto e bem-estar para residentes urbanos, benefícios estéticos, ecológicos, políticos, econômicos e sociais, amplamente abordados por diversos autores.

No entanto, também há custos a serem considerados: no caso de árvores urbanas, eles incluem não apenas os custos diretos de plantio e manutenção (VOGT *et al.*, 2015), mas uma longa lista de custos indiretos, incluindo danos a edifícios e pavimentos causados por raízes de árvores, danos e ferimentos por queda de árvores, interrupção do tráfego durante a manutenção, emissões de carbono por meio de máquinas em operação, bloqueio de drenos por serapilheira e poluição do ar por compostos orgânicos voláteis emitidos pela folhagem, para citar apenas alguns (VOGT *et al.*, 2015).

Para Moore (2009), os benefícios econômicos das árvores urbanas são frequentemente subestimados, enquanto os custos de danos e incômodos que as árvores causam são amplamente relatados. Pandit *et al.* (2012) afirmam que os benefícios econômicos associados às árvores urbanas de rua não podem ser facilmente quantificados, pois geralmente não têm valor de mercado.

No entanto, estimar os benefícios econômicos das árvores nas ruas pode fornecer uma base quantificável para manter os programas municipais de cuidado com as árvores e plantar mais. Apresentar os benefícios em termos monetários permite que os benefícios sejam facilmente compreendidos por formuladores de políticas e tomadores de decisão (MULLANEY *et al.* 2015).

As árvores nas ruas podem reduzir os custos de energia e aumentar a receita comercial e o valor das propriedades (MULLANEY *et al.* 2015). Pandit e Laband (2010) apresentam, em seu estudo, o potencial de economia de energia obtido com o plantio de árvores nas ruas. Os autores relataram que as árvores em Auburn, no Estado americano do Alabama, reduziram o uso de energia no verão em 3,8% em comparação com as casas sem sombra e que o consumo de eletricidade foi reduzido em 1,29 kW h/dia para cada 10% de cobertura de sombra.

As árvores urbanas e os espaços verdes urbanos também desempenham um papel positivo na redução do escoamento das águas pluviais. Neste sentido, Zhang *et al.* (2012) avaliaram os benefícios econômicos da redução do escoamento de água da chuva por espaços verdes urbanos. Os resultados mostraram que o benefício econômico total foi de 1,34 bilhões de RMB em 2009 (RMB: moeda chinesa, US \$ 1 = RMB6,83), o que equivale a três quartos do custo de manutenção dos espaços verdes de Pequim.

Outro benefício econômico é a valorização de áreas e imóveis pela presença de

arborização, contribuindo significativamente para o valor de uma propriedade urbana. Nos Estados Unidos, as propriedades com presença de árvores são mais valiosas que as não arborizadas (ISA, 2006). Em Curitiba, há uma grande especulação imobiliária, com o aumento dos valores das propriedades próximas a parques, hortos e ruas arborizadas (BIONDI; ALTHAUS, 2005).

Para McPherson e Simpson (2002), o valor econômico das árvores refere-se aos seus benefícios e custos. Dada essa combinação complexa de benefícios e custos, não é surpreendente que o plantio de árvores em ambientes urbanos possa ser politicamente controverso, com diferentes grupos de interesse, enfatizando as consequências positivas ou negativas (SONG *et al.*, 2018). Desta forma, é importante quantificar os custos e benefícios da arborização urbana e conhecer o ponto de equilíbrio.

Como já mencionado, a arborização urbana proporciona importantes serviços ecossistêmicos, porém, cada vez mais, ela compete pelo espaço com grandes superfícies cinzentas, o que pode torná-la um elemento secundário no planejamento das cidades. A valoração monetária das árvores urbanas aparece, então, como mais uma alternativa capaz de mostrar a relevância desses seres vivos.

Um estudo realizado na cidade de Lisboa, Portugal (SOARES *et al.*, 2011) revelou que as árvores de rua desta cidade fornecem serviços avaliados em 8,4 milhões de dólares por ano, enquanto US\$ 1,9 milhão são gastos em sua manutenção. Para cada US\$ 1 investido no manejo de árvores, os residentes recebem US\$ 4,48 em benefícios. A economia de energia chegou a 6,20 dólares por árvore, e o aumento do valor imobiliário, a 144,70 dólares por árvore.

Outro estudo realizado em Dalian, na China (WANG *et al.* 2018), analisou as características estruturais das árvores de rua e estimou o valor monetário dos serviços ecossistêmicos fornecidos aos residentes da cidade. As árvores das ruas de Dalian forneceram benefícios estruturais e funcionais substanciais. O valor estrutural das árvores foi de aproximadamente 130 milhões de dólares, com um valor de 4,5 milhões de dólares para armazenamento de carbono. Os benefícios funcionais anuais das árvores foram de 4,9 milhões de dólares. As árvores de rua aumentaram o valor da propriedade com um valor anual estimado de 1,5 milhão de dólares. Os benefícios anuais de economia de energia de todas as árvores de rua em Dalian foram de 1,7 milhão de dólares. O benefício líquido de redução de dióxido de carbono foi avaliado em 0,9 milhão de dólares. O estudo enfatizou ainda que o município de Dalian gastou, aproximadamente, 1,5 milhão dólares anualmente no manejo de árvores. Os benefícios líquidos anuais foram de 3,4 milhões de dólares. Os residentes da cidade receberam 3,2 dólares em benefícios de cada 1 dólar investido em custos de gestão de árvores

de rua. Portanto, os resultados deste estudo sugerem que os benefícios produzidos pela arborização compensam os custos de manejo.

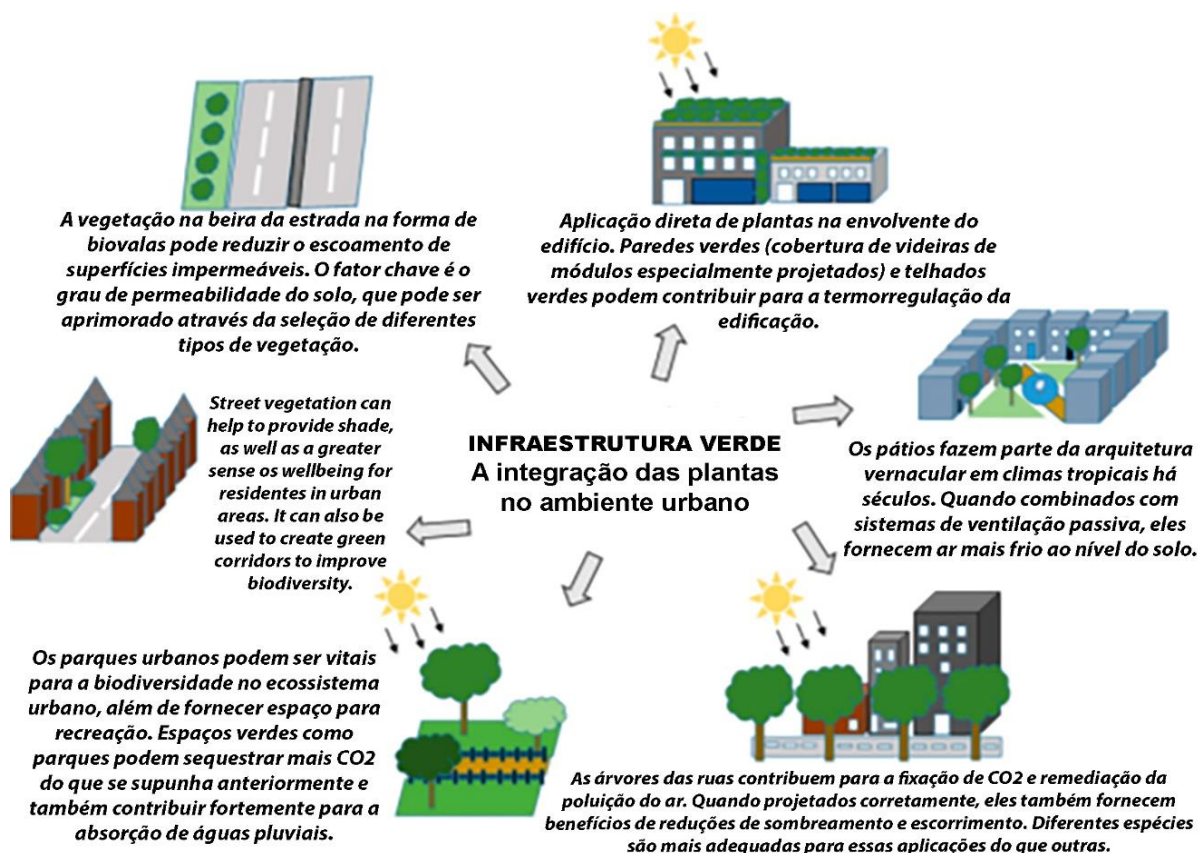
Um estudo realizado por McPherson *et al.* (2016) na Califórnia, Estados Unidos, revelou que as árvores das ruas do Estado removem 567.748 toneladas de CO₂ anualmente, equivalente a retirar 120.000 carros das ruas. O valor anual de todos os serviços ecossistêmicos é de 1 bilhão de dólares ou US\$ 110,63 dólares por árvore. Dado um custo médio anual por manejo de árvore de 19,00 dólares, 5,82 dólares em benefícios são devolvidos para cada 1 dólar gasto.

No Brasil, uma pesquisa realizada por Mendes *et al.* (2021) na cidade de Piracicaba, São Paulo, desenvolveu um método simplificado de valoração baseado na relação entre a área da copa, o Índice de Área Foliar (IAF) e um parâmetro médio R\$/m² de copa. Os resultados mostraram que a valoração monetária das 60.146 árvores urbanas pode retornar aproximadamente R\$ 41 milhões por ano em serviços ecossistêmicos. Os autores ressaltam que investigações como esta, as chamadas Soluções Baseadas na Natureza, poderão auxiliar no planejamento, gestão e formulação de políticas públicas, e até como pagamento por serviços ambientais (descontos em IPTU) aos moradores que possuam árvores em frente à sua casa.

2.1.3 INFRAESTRUTURA VERDE URBANA E SAÚDE HUMANA

Há evidências crescentes de vários campos científicos de que a exposição ao ambiente natural pode melhorar a saúde humana. Revisões recentes destacam os efeitos das árvores especificamente, ou do espaço verde de forma mais geral, no bem-estar físico, mental e social (Lee e Maheswaran, 2010; Takano *et al.*, 2002; Meas *et al.*, 2006; Payam *et al.*, 2015; Nesbitt *et al.*, 2017; van den Bosch e Ode Sang, 2017; Kondo *et al.*, 2018; Wolf *et al.*, 2020). A Figura 5, extraída e adaptada de Wootton-Beard *et al.* (2016), ilustra exemplos de infraestrutura verde urbana e suas contribuições potenciais para a saúde e o bem-estar dos moradores urbanos.

Figura 5 – Exemplos de infraestrutura verde urbana e suas contribuições potenciais para a saúde e o bem-estar dos moradores urbanos

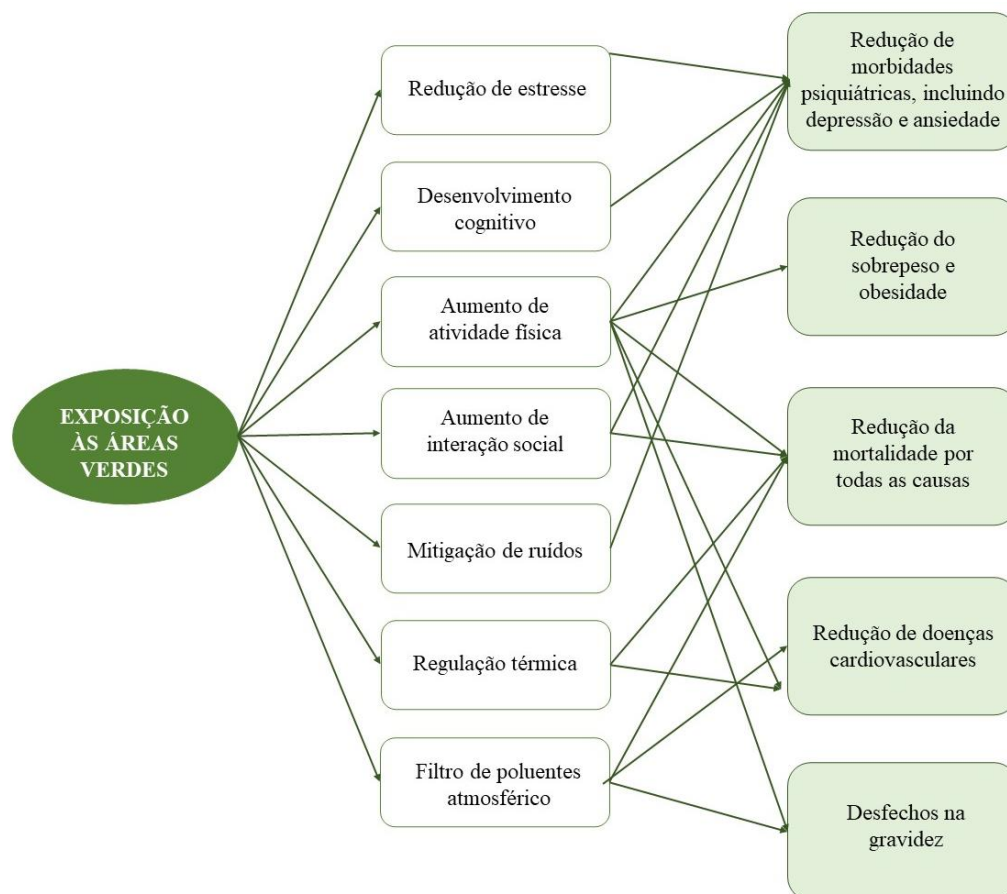


Fonte: extraída e adaptada de Wootton-Beard et al. (2016)

Os espaços verdes urbanos podem fornecer vários benefícios para a saúde humana, promovendo um aumento da atividade física (LEE e MAHESWARAN, 2010; TAKANO *et al.*, 2002; PERSSON *et al.*, 2018; PEREIRA *et al.*, 2013), melhorando a qualidade do ar (RAO *et al.*, 2014; NOWAK *et al.*, 2014; Hu *et al.*, 2008), reduzindo a poluição sonora (VIVANCO-HIDALGO *et al.*, 2019) e proteção contra ondas de calor e eventos climáticos extremos (CHEN *et al.*, 2014) e contribuir para a saúde mental, aumentando as atividades recreativas e reduzindo o estresse (BRATMAN *et al.*, 2012; NESBITT *et al.*, 2017).

Na revisão sobre como os espaços verdes urbanos beneficiam a saúde humana, desenvolvida por James *et al.* (2015), apresentam-se, com base em evidências de pesquisas, os mecanismos pelos quais o verde circundante pode afetar a saúde. A Figura 6, extraída e adaptada de James *et al.* (2015), demonstra os caminhos percorridos pelas infraestruturas verdes, agindo sobre a saúde e o bem-estar das pessoas.

Figura 6 – Caminhos pelos quais as áreas verdes urbanas podem influenciar na saúde humana



Fonte: adaptado de James *et al.* (2015).

Na pesquisa de Persson *et al.* (2018), foi explorada a associação entre a exposição de longo prazo ao verde residencial urbano e marcadores de adiposidade. Os resultados demonstraram que a maior exposição de longo prazo ao verde foi associada a um aumento reduzido na circunferência da cintura e menor risco de adiposidade em mulheres. Em homens e mulheres, a baixa exposição à vegetação combinada com outros fatores de risco ambientais pareceu particularmente prejudicial. Pereira *et al.* (2013) investigaram a relação entre o peso corporal de indivíduos de uma população e a vegetação de vizinhança. Os resultados concluíram que níveis mais altos e maior variação do verde da vizinhança estão associados a menores chances de obesidade entre adultos de todas as idades.

Takano *et al.* (2002) concluíram, em sua pesquisa, que viver em áreas com espaços verdes transitáveis influenciou positivamente a longevidade dos idosos urbanos, independentemente de sua idade, sexo, estado civil, estado funcional inicial e nível socioeconômico. Os autores enfatizam, ainda, que as áreas públicas com presença de vegetação que são próximas e fáceis de caminhar devem ser priorizadas no planejamento urbano para o

desenvolvimento de áreas densamente povoadas. Uma estreita colaboração deve ser empreendida entre os setores de saúde, construção, engenharia civil, planejamento e outros setores interessados no contexto da política urbana saudável, de modo a promover a saúde dos idosos.

As árvores removem a poluição do ar pela interceptação de partículas nas superfícies das plantas e pela absorção de poluentes gasosos através dos estômatos das folhas. Neste sentido, Rao *et al.* (2014) desenvolveram um estudo, no qual se apresentou uma forte correlação entre a redução do poluente atmosférico NO₂ e árvores urbanas, contribuindo, perceptivelmente, para a melhoria da saúde respiratória humana. Os autores ainda estimaram o valor econômico dos benefícios à saúde da ordem de milhões de dólares (em uma base anual) devido à redução da incidência de problemas respiratórios, proporcionados pelas árvores por meio da redução de NO₂.

Seguindo esta mesma linha de pesquisa, Nowak *et al.* (2014) estimaram a quantidade de poluição do ar removida permanentemente por árvores em áreas urbanas e rurais do interior dos Estados Unidos em 2010, e seu valor monetário associado e impacto na saúde humana. Os resultados revelaram que as árvores removeram 17,4 milhões de toneladas de poluição do ar, com efeitos na saúde humana avaliados em 6,8 bilhões de dólares americanos. A maior parte da remoção da poluição ocorreu nas áreas rurais, enquanto a maioria dos impactos e valores para a saúde ocorreram nas áreas urbanas. Os impactos na saúde incluíram a prevenção de mais de 850 mortes e 670.000 incidências de sintomas respiratórios agudos.

Com o objetivo de examinar a associação de acidente vascular cerebral com poluição do ar, renda e vegetação, Hu *et al.* (2008) desenvolveram uma pesquisa no noroeste da Flórida. Alto risco de mortalidade por AVC foi encontrado em áreas com baixo nível de renda, alto nível de poluição do ar e baixo nível de exposição a espaços verdes.

Chen *et al.* (2014) direcionaram sua pesquisa investigando o potencial da vegetação urbana para reduzir a mortalidade relacionada ao calor. Os resultados indicaram que a vegetação urbana pode reduzir potencialmente a taxa de mortalidade excessiva devido ao estresse por calor. Os dados demonstraram que um aumento na cobertura da vegetação de 15% para 33% pode reduzir a taxa média de mortalidade relacionada ao calor na faixa entre 5% e 28%.

Vários estudos vêm demonstrando que os espaços verdes dentro de um contexto urbano mostraram ser um recurso para a restauração psicológica, o que indica que pode reduzir o estresse psicológico. Os resultados da pesquisa de Gascon *et al.* (2018) sugerem um papel protetor dos espaços verdes na saúde mental (depressão e ansiedade). Beyer *et al.* (2014) concluíram, em seus estudos, que níveis mais altos de espaço verde na vizinhança são

associados a níveis significativamente mais baixos de sintomatologia para depressão, ansiedade e estresse. Os resultados sugerem que “tornar-se mais verde” pode ser uma estratégia potencial de melhoria da saúde mental da população nos Estados Unidos. O estudo de Song *et al.* (2019) sugere o impacto protetor da vegetação urbana sobre os sintomas depressivos. Os resultados da pesquisa de Mukherjee *et al.* (2017) fornecem evidências preliminares de que grandes parques nas imediações da residência de um indivíduo na Índia estão associados à menor probabilidade de depressão. A revisão sistemática realizada por Berg (2015) demonstrou que há fortes evidências para associações positivas significativas entre a quantidade de espaço verde (medido objetivamente ao redor da residência) e saúde mental percebida.

Kardan *et al.* (2015) realizaram uma pesquisa com a população urbana do grande centro de Toronto, no Canadá. Com base relatos pessoais, e combinando com mapeamentos de grupos de árvores e árvores individuais, por meio de imagens de satélites de alta resolução, analisaram a percepção geral de saúde, condições cardiometabólicas e doenças mentais. Os resultados estatísticos sugerem que as pessoas que vivem em bairros com uma maior densidade de árvores em suas ruas possuem, significativamente, maior percepção de saúde e melhores condições cardiometabólicas.

Estudos têm demonstrado que a exposição ao chamado espaço verde tem um efeito sobre a saúde e os comportamentos relacionados à saúde (MITCHELL e POPHAM, 2008). Na pesquisa destes autores, utilizando dados contidos em registros de mortalidades e a exposição de grupos aos espaços verdes, buscou-se determinar se a mortalidade por todas as causas e por causas específicas (doenças circulatórias e câncer de pulmão, por exemplo) ocorridas entre os anos de 2001 e 2005 variava conforme exposição ao espaço verde. O estudo conclui que o estado de saúde esteja mais bem pronunciado em populações com maior exposição a espaços verdes, pois as taxas de mortalidades por todas as causas e de mortalidades por doenças circulatórias foram menores nestes grupos.

Contudo, é possível observar que, com base em estudos desenvolvidos, principalmente na Europa e na América do Norte, as evidências são claras quando se associam presença/uso de áreas verdes com resultados positivos para a saúde. Presença de infraestrutura verde no ambiente urbano associa-se à diminuição da população obesa, menor risco de desenvolver doença cardiovascular e mentais, diminuição do estresse, aumento das relações sociais e o nível de atividade física. Algumas grandes cidades do mundo têm investido em programas de arborização como maneira de melhorar a saúde urbana como um todo. No Brasil, ainda é escasso que investiguem a relação de áreas verdes e saúde em centros urbanos. Eles são extremamente necessários e podem contribuir na formação de políticas públicas que norteiem

planos de arborização voltados a essa realidade. A crise da COVID-19 que vivenciamos nos últimos tempos ressalta a importância de preservar e desenvolver ainda mais a infraestrutura verde urbana. Muito tem sido falado que o mundo mudará fundamentalmente com a experiência da crise. Desta forma, espera-se que o desenvolvimento expandido de espaços verdes urbanos seja parte dessa mudança.

2.1.4 CONFORTO AMBIENTAL E PERCEPÇÃO SOBRE A VEGETAÇÃO ARBÓREA NO AMBIENTE URBANO

2.1.4.1 Percepção sobre as árvores urbanas

Muito já se sabe sobre os benefícios ambientais, econômicos, sociais e estéticos que as árvores urbanas exercem no cotidiano dos ocupantes do espaço urbano. No entanto, os atributos positivos das árvores nas ruas não são os únicos percebidos pelas pessoas. Para Dandy (2010), nas ruas, árvores convivem com pessoas e edifícios, o que aumenta as oportunidades de interações negativas.

Os custos de manutenção, os danos potenciais às infraestruturas urbanas, os resíduos verdes produzidos e as alergias causadas pela polinização podem levar as pessoas a reclamarem e a sentirem que, de alguma forma, as árvores são inadequadas, como afirma Escobedo *et al.* (2011) em seu estudo. No entanto, muitas pessoas têm percepções gerais muito positivas sobre árvores urbanas, como pode ser observado em diversos estudos (FLANNIGAN, 2005; SCHROEDER *et al.*, 2006; WEBER *et al.*, 2014; DAVIS e JONES, 2014).

As cidades são sistemas que incluem componentes naturais e criados pelo homem. Quando uma cidade cresce sem um planejamento adequado, ela tende a ter baixa qualidade ambiental. Em caso de pretender melhorar a qualidade ambiental, a opinião das pessoas deve ser levada em consideração para uma melhor aceitação das decisões de gestão urbana. Neste sentido, vários estudos sobre a percepção do público, atitudes e opiniões em relação às árvores urbanas foram conduzidos para entender o que leva as pessoas a aprovarem ou não a convivência cotidiana no ambiente urbano com árvores.

Destes estudos, a pesquisa desenvolvida por Fernandes *et al.* (2019) explorou a percepção pública sobre a atual adequação da arborização viária de um bairro costeiro do Porto, em Portugal. As implicações dos resultados no planejamento e projeto de infraestrutura verde urbana aconselham um ajuste das dimensões das árvores às dimensões das ruas, um aumento na diversidade das árvores nas ruas e um projeto aprimorado de plantio de árvores nas ruas. Os

resultados também sugerem que um investimento em educação e informação pode levar à mitigação de conflitos.

Partindo do pressuposto de que os benefícios das árvores no planejamento urbano são insuficientemente reconhecidos e há pouco conhecimento sobre as características das árvores que são relevantes para os humanos e como elas são avaliadas, Gerstenberg e Hofmann (2016) apresentaram, em seu estudo, os parâmetros da árvore perceptual e sua relação com as preferências humanas. O estudo identificou as características das árvores que estão relacionadas ao modo como os humanos as percebem. Os autores ressaltam que é crucial a distinção entre coníferas e árvores decíduas. Que a forma, o tamanho, a densidade da copa e a altura do tronco também são importantes. Observaram também que a densidade da coroa e a relação entre o tamanho da coroa e a altura do tronco predizem a preferência.

Ng *et al.* (2015) desenvolveram um estudo em Hong Kong que teve como objetivo explorar a percepção das pessoas sobre o plantio de árvores em ruas e os impactos percebidos. Os resultados indicaram que a maioria deles tinha opiniões positivas sobre o plantio de árvores em ruas, preferencialmente, árvores plantadas nos dois lados da rua. A maioria dos entrevistados neste estudo percebeu que as árvores poderiam melhorar a qualidade do ar no nível da rua, bloquear a luz solar, proporcionar sombreamento e diminuir a temperatura do ar no nível da rua.

No entanto, ao contrário dessa percepção convencional de que o plantio de árvores pode melhorar a qualidade do ar, alguns estudos demonstram que o plantio de árvores, especialmente em áreas de alta poluição, como vias de alto tráfego, pode realmente resultar em um aumento nas concentrações de poluentes no nível do pedestre (BUCCOLIERI *et al.*, 2011; VOS *et al.*, 2012; AMORIM *et al.*, 2013; JANHÄLL *et al.* 2015; ABHIJITH *et al.* 2017; GUO *et al.* 2021; NG e CHAU, 2012; SALIM *et al.*, 2011).

O estudo conduzido por Camacho-Cervantes e Schondube (2014) avaliou a percepção das pessoas sobre as árvores, com uma amostra controlada de cidadãos da cidade de Morelia, centro-oeste do México. Os resultados apontaram que, embora as pessoas percebam que as árvores em áreas urbanas podem causar danos, muitas vezes, mostram mais interesse pelos benefícios relacionados e consideram que deveria haver mais árvores nas cidades. Os benefícios relacionados mais mencionados foram o suprimento de oxigênio e sombra; os danos relacionados às árvores mais citados foram acidentes e danos à infraestrutura urbana. A maioria dos entrevistados afirmam que mais árvores são necessárias na cidade.

Monteiro *et al.* (2013) desenvolveram um trabalho que objetivou verificar a percepção dos usuários da Avenida Cândido de Abreu, Curitiba, Paraná, em relação à sua arborização.

Para os transeuntes, a arborização foi reconhecida, principalmente, pelos benefícios ecológicos que proporciona. As maiores desvantagens apontadas foram a sujeira, a segurança e a acessibilidade que podem ser agravados pela presença da arborização. Entendeu-se também que a arborização é de responsabilidade da Prefeitura e que esta deveria melhorá-la.

Nesta mesma linha de pesquisa, Drew-Smythe *et al.* (2023) realizaram um estudo com residentes de uma região subtropical no leste da Austrália para determinar as percepções da comunidade sobre os serviços e desserviços ecossistêmicos relacionados às plantações de árvores urbanas. Os resultados desta pesquisa encontraram fortes evidências de um alto nível de conscientização pública sobre os serviços ecossistêmicos benéficos que as árvores urbanas podem fornecer. Um amplo espectro de serviços de árvores benéficas foi altamente valorizado pela comunidade em seu ambiente urbano, incluindo o fornecimento de sombra e redução do calor, permitindo uma forte ligação com a natureza, potencial de armazenar carbono para mitigar as mudanças climáticas e propriedades esteticamente agradáveis. Ao mesmo tempo, porém, as preocupações da comunidade sobre os maus serviços das árvores concentravam-se, principalmente, nos danos das raízes à infraestrutura, bem como nos danos à propriedade e nos prejuízos causados pela queda dos galhos.

É importante levar em consideração a perspectiva dos moradores da cidade ao projetar o plantio de árvores e os espaços verdes urbanos. No geral, o projeto de um espaço verde que considera as percepções e preferências humanas sobre as árvores pode aumentar a satisfação residencial e fortalecer os efeitos físicos e psicológicos positivos das árvores em ambientes urbanos (GERSTENBERG e HOFMANN, 2019). Ao fornecer uma base para isso (os diversos estudos que consideram a percepção dos residentes urbanos) pode-se melhorar a tomada de decisão centrada no usuário em relação ao plantio de árvores nas cidades. Esforços para avaliar e entender as percepções das pessoas sobre as florestas urbanas são necessários para permitir que os planejadores e gestores urbanos incorporem melhor as diversas necessidades da comunidade na arborização urbana (BARONA *et al.*, 2022).

2.1.4.2 O efeito das árvores urbanas no conforto e bem-estar

Segundo o Relatório do IPCC – 2021 (IPCC, 2021), o mundo, provavelmente, atingirá ou excederá 1,5° C de aquecimento nas próximas duas décadas, mais cedo do que em avaliações anteriores. Com o aumento das temperaturas associadas aos efeitos das ilhas de calor urbanas e às mudanças climáticas globais, a vegetação é uma estratégia eficaz para mitigar o estresse térmico da população urbana, como revisado no trabalho de Lai *et al.* (2019). Estes autores

afirmam que o incentivo ao uso de espaços urbanos ao ar livre ocorreria com a redução do estresse térmico por meio da vegetação, promovendo a saúde dos usuários.

Inúmeros estudos já comprovaram que as árvores interagem com o ambiente habitável. Sua presença ou ausência resulta em diferenças significativas no clima local, podendo influenciar tanto o microclima de uma região quanto o microclima em torno de um edifício. A arborização inserida no meio urbano pode oferecer proteção solar para os edifícios, reduzindo o consumo de energia para o condicionamento térmico interior devido à sua sombra, influenciando nas trocas de calor e provocando diminuição das temperaturas (VILLALBA *et al.*, 2014). Segundo Sattler *et al.* (1987), embora seja fácil reconhecer as vantagens de um bom desenho arbóreo, a complexidade da interação árvore-ambiente, resultante da variabilidade dos elementos envolvidos, faz com que se torne difícil o estabelecimento de linhas de orientação para a concepção. No estudo de Donovan e Butry (2009), o sombreamento proveniente do entorno arborizado resultou em uma redução aproximada de 5% no consumo de energia elétrica com condicionador de ar.

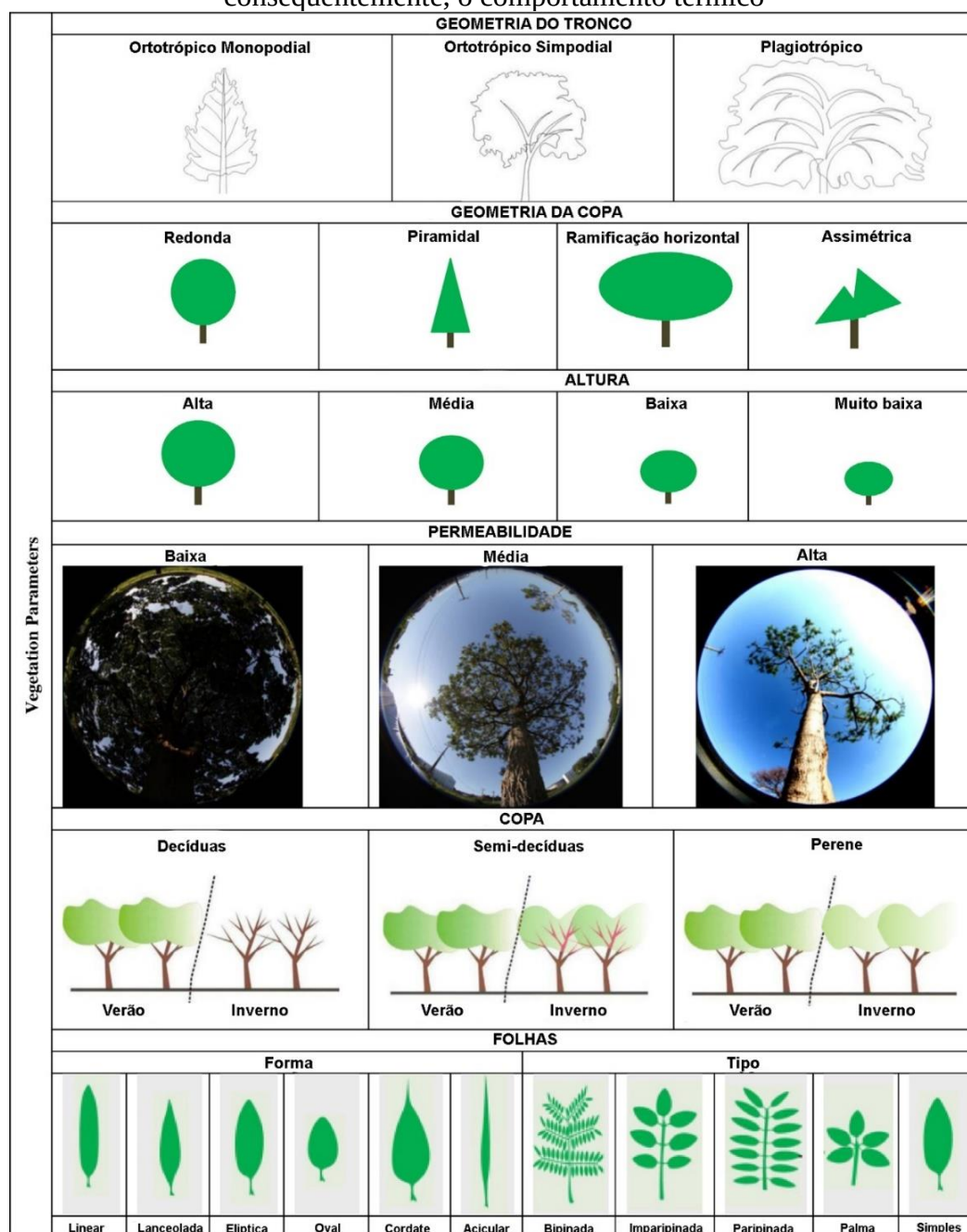
Na concepção dos espaços urbanos, três fatores são de suma importância e afetam o nível de conforto térmico: a morfologia do espaço urbano, a orientação dos elementos e espaços e a vegetação (YAHIA e JOHANSSON, 2014). Hertel e Schlink (2019) afirmam que o maior aumento de calor em ambientes urbanos ocorre em espaços onde superfícies com materiais impermeáveis absorvem mais luz, onde a quantidade de vegetação e o nível geral de sombra são menores. Por meio do fenômeno da evapotranspiração e do controle e reflexão da luz radiante, as plantas reduzem a temperatura radiante média e melhoram as condições ambientais (SALATA *et al.*, 2017). Desta forma, as árvores oferecem conforto térmico ao enfraquecer a luz radiante do sol e mediante seu potencial de resfriamento por meio da evapotranspiração.

A forma e a densidade da copa de árvores influenciam a sombra projetada e a quantidade de radiação filtrada. A quantidade de radiação interceptada depende da densidade dos galhos, ramos e cobertura foliar. Esses elementos influenciam as características gerais da forma e densidade da árvore. As qualidades de sombra das árvores também são influenciadas pela individualidade dos troncos e das folhas, que devem ser consideradas (ABREU-HARBICH *et al.*, 2012; SCUDO, 2002).

Estudos já indicaram que espécies arbóreas no Brasil podem atenuar a radiação solar de 76,3 a 92,8% nos meses de verão (ABREU-HARBICH *et al.*, 2012; BUENO-BARTHOLOMEI e LABAKI, 2003). Estes resultados confirmam que a estrutura da copa, a dimensão, a forma e a cor das folhas influenciam nos níveis de redução da radiação solar. É importante observar os parâmetros da vegetação que afetam a radiação solar e o vento em relação às suas estratégias

de controle térmico e seus diferentes elementos verdes. Também é importante quantificar as condições térmicas das árvores com medições de campo e combinar esses resultados com as características das árvores para melhorar o projeto de implantação de árvores urbanas. Assim, plantar as árvores certas nas cidades pode melhorar e adaptar as cidades às mudanças climáticas (ABREU-HARBICH *et al.*, 2015). A Figura 7, extraída de Abreu-Harbich *et al.* (2015), ilustra os parâmetros da vegetação que afetam a radiação solar e o vento e, consequentemente, o comportamento térmico.

Figura 7 – Parâmetros da vegetação que afetam a radiação solar e o vento e, consequentemente, o comportamento térmico



Fonte: adaptado de Abreu-Harbich et al. (2015).

Diversos estudos enfatizam que urbanistas e os responsáveis pelas políticas ambientais precisam selecionar coberturas de copas de árvores, arranjos e locais apropriados para maximizar o potencial de resfriamento da vegetação urbana (GUNAWARDENA *et al.*, 2017; LANGENHEIM *et al.*, 2020; MORAKINYO *et al.*, 2020). O potencial de resfriamento das copas das árvores, provavelmente, diferiria de acordo com as várias zonas climáticas (BOWLER *et al.*, 2010; NIU *et al.*, 2020; TSOKA *et al.*, 2018) e exigiria estudos de campo em diferentes climas.

Devido à atenuação solar combinada à capacidade de resfriamento evaporativo das árvores, a criação de um ambiente termicamente confortável pode ser alcançada, especialmente em cidades tropicais e subtropicais (BOWLER, 2010; GÓMEZ-BAGGETHUN e BARTON, 2013). Segundo McPherson *et al.* (2011) e Armson *et al.* (2012), esses efeitos reduzem a temperatura do ar e da superfície abaixo da copa das árvores mais do que nas áreas não sombreadas circundantes e, portanto, reduzem o armazenamento de calor e a convecção, embora as árvores também reduzam a ventilação (GROMKE, 2011).

Especificamente, o efeito de sombreamento das árvores causa a redução da temperatura radiante média no nível da rua, que é um dos principais determinantes da sensação térmica (TAN *et al.*, 2013). No entanto, a magnitude da atenuação solar e a redução da temperatura radiante varia de acordo com as espécies de árvores e características estruturais, ou seja, densidade foliar, altura da árvore, diâmetro da copa, taxa de cobertura e proximidade umas das outras (BERRY *et al.*, 2013).

Diversos estudos recentes, em vários lugares do mundo, já evidenciaram o impacto da vegetação urbana no conforto térmico. Em 2012, Ng *et al.* (2012) realizaram estudos paramétricos que foram conduzidos para investigar a localização preferencial, a quantidade e os tipos de vegetação para o planejamento urbano na cidade de Hong Kong. Os resultados desse estudo mostraram que, para uma cidade como Hong Kong, que tem a relação altura do edifício/largura da rua bastante elevada, as árvores são sugeridas como mais eficazes do que as superfícies de grama no resfriamento de áreas para pedestres. Evidenciou-se também que a quantidade de plantio de árvores necessária para reduzir a temperatura do ar do nível dos pedestres em cerca de 1° C é de, aproximadamente, 33% da área urbana.

O estudo de Abreu-Harbich *et al.* (2015) buscou quantificar o comportamento microclimático diário e sazonal com a presença de várias espécies de árvores com diferentes projetos de plantio, tanto individuais quanto em grupos. Os resultados mostram que o sombreamento de árvores pode influenciar significativamente o conforto térmico humano, reduzindo a temperatura equivalente fisiológica entre 12 e 16° C. Os autores enfatizam que a

vegetação apropriada usada para sombreamento de áreas públicas e privadas é essencial para mitigar o estresse causado pelo calor e pode criar melhor conforto térmico para o homem, especialmente nas cidades. O estudo foi realizado na cidade de Campinas, Brasil.

Um estudo similar foi realizado por Teshnehdel *et al.* (2020), e os resultados revelaram que o melhor cenário estudado proporciona melhoria na temperatura fisiológica dos indivíduos no verão de 34,92° C para 26,16° C, passando, assim, de uma sensação térmica quente para uma ligeiramente quente.

Os parâmetros relacionados ao conforto térmico ao ar livre, como temperatura do ar, temperatura da superfície, velocidade do vento, fator de visão do céu, temperatura radiante média e temperatura fisiológica equivalente em uma rua urbana também foram analisados na recente pesquisa desenvolvida em Roorkee, Índia, por Mohammad *et al.* (2021). Os autores analisaram o papel do coeficiente de reflexão dos materiais e da quantidade de vegetação como soluções para aumentar o conforto térmico em uma rua urbana. Os resultados mostraram que o fator de visão do céu não é um indicador preciso para a exposição à radiação e condições de conforto. Outros estudos também já evidenciaram que apenas o fator de visão do céu não pode quantificar com precisão a geometria urbana. Edifícios e árvores também devem ser considerados de forma diferenciada (WONG e STEVE, 2010; KRÜGER *et al.*, 2011; YAN *et al.*, 2022).

Além disso, a pesquisa de Mohammad *et al.* (2021) ainda enfatiza que a combinação de calçadas de baixo coeficiente de reflexão e cobertura de metade da rua com árvores podem produzir as condições mais eficazes para o conforto térmico. O efeito do coeficiente de reflexão das superfícies no conforto térmico é menos significativo do que a cobertura das superfícies por árvores (MOHAMMAD *et al.* (2021).

Azcarate *et al.* (2021) desenvolveram, em sua pesquisa, uma metodologia baseada em fórmulas matemáticas para determinar as propriedades geométricas e a posição mais adequadas das árvores a serem plantadas em um cânion urbano, com base na orientação solar e na altura dos edifícios. A metodologia baseia-se no sombreamento da maior área de superfície possível das áreas destinadas aos pedestres de um cânion por meio das espécies de árvores apropriadas, mas também requer uma avaliação do conforto térmico e da transmissividade da árvore. Os autores enfatizaram que a metodologia proposta é de interesse para urbanistas e planejadores de cidades para a tomada de decisão ao integrar árvores, de modo que o desenvolvimento da via urbana possa melhorar o conforto térmico dos pedestres.

Hami *et al.* (2019) realizaram uma revisão sobre os efeitos dos espaços verdes no microclima e no conforto térmico em ambientes urbanos. Os resultados da revisão revelaram

que vários fatores relacionados à atenuação térmica por meio da vegetação ainda não receberam atenção adequada em estudos anteriores. Estes incluem os efeitos de padrões, arranjo de diferentes formas de árvores e arbustos, a distribuição e conexão de manchas de espaço verde na paisagem urbana, a direção das linhas de plantio em diferentes condições de vento, entre outros.

Poucos estudos, a exemplo de Chen *et al.* (2021), examinaram concomitantemente os efeitos das árvores no conforto térmico e visual em ambiente urbano. Desta forma, o conhecimento sobre o efeito da vegetação no conforto visual ainda tem muitas lacunas. A presença de árvores pode reduzir a iluminância no nível do pedestre em até 140 klux. Os estudos dos efeitos combinados da vegetação urbana no conforto visual e térmico do exterior podem ser importantes para resolver questões voltadas a contradições de configurações urbanas com a presença de vegetação (CHEN *et al.*, 2021).

2.1.5 VEGETAÇÃO ARBÓREA URBANA E A ILUMINAÇÃO NATURAL

A análise da iluminação natural é um processo complexo devido à natureza dinâmica do sol, às características do clima e aos fatores relacionados ao ambiente construído. O fluxo luminoso que atinge uma superfície do ambiente interno pode alcançá-la por três caminhos, resultante de sua divisão em três componentes: a componente celeste (CC), a componente refletida externa (CRE) e a componente refletida interna (CRI). O somatório dessas três componentes resulta no total da iluminação que atinge determinado ponto (HOPKINSON *et al.*, 1966). O cálculo de cada uma dessas componentes justifica-se, individualmente, pelo fato de cada uma sofrer influência de fatores diferentes (SZOKOLAY, 1980).

Um dos principais fatores que interfere na componente refletida externa é a presença de vegetação no entorno externo. Os elementos da vegetação e da paisagem têm propriedades tridimensionais únicas que podem neutralizar ou difundir a luz solar em algumas situações. As geometrias 3D complexas e mutáveis, bem como as propriedades de dispersão e transmissão da luz, tornam a incorporação da vegetação nos projetos de iluminação natural bastante complexa. Como resultado, a maioria das decisões de projeto de iluminação natural relacionadas à paisagem arquitetônica circundante é limitada à aplicação geral, ou recebe pouca atenção devido à falta de orientação e técnicas confiáveis de modelagem de simulação (TREGENZA e WILSON 2011).

As árvores são elementos complexos que resultam em fenômenos de reflexão, difusão, obstrução da luz, que variam com a posição solar e o clima (BALAKRISHNAN e JAKUBIEC,

2016; VILLALBA *et al.*, 2014). A transmissão da luz através das copas das árvores depende do ângulo de incidente solar, juntamente com o tamanho do dossel, densidades de área foliar e frações de lacunas da copa (SADEGHI e MISTRICK, 2022).

É importante mensurar a luz que passa através de uma copa de árvore, considerando a época do ano e a posição em relação à superfície de um edifício. Diversas espécies são difíceis de modelar, pois exibem uma série de características, como diferenças sazonais e morfológicas. Esses efeitos temporais complexos e variáveis das árvores são frequentemente estimados ou totalmente ignorados devido a essas complexidades (PAN e JAKUBIEC, 2022).

Considerando a árvore como parte de um processo de planejamento urbano, Chaikyul (2004) afirma que um método simples de prever o efeito das árvores é necessário. Em seu estudo, o autor descreve um método simples para estimar a luz do dia em desfiladeiros urbanos com árvores sob várias condições de céu. São introduzidos os efeitos das árvores na redução da luz do dia no desfiladeiro urbano. A avaliação do método é mostrada, fornecendo comparação entre os valores modelados e os valores medidos obtidos a partir de medições de campo.

Partindo do pressuposto de que o comportamento da iluminação das árvores, como elementos de controle solar, assemelha-se mais a um sistema de venezianas do que a outros sistemas de controle solar, Villalba *et al.* (2014) verificaram simplificações de modelos de copas arbóreas e analisaram qual se ajusta mais a um caso real. As comparações são feitas entre os dados medidos da iluminância vertical *in situ* e as obtidas por simulação para cada um dos modelos verificados. O modelo de venezianas foi o que apresentou maior grau de ajuste à situações reais. Os autores enfatizam que, este tipo de estudo pode ser útil para agilizar a análise do impacto das árvores urbanas na disponibilidade de luz do dia em fachadas de edifícios por meio de simulação.

Segundo Louafi *et al.* (2017), as árvores aumentam a qualidade dos espaços públicos por sua influência na luz do dia e no ambiente visual, limitando o brilho. Porém, segundo HOPKINSON *et al.* (1975), o planejamento da luz natural exige atenção especial, elementos naturais como a vegetação arbórea podem provocar uma obstrução considerável, que se traduz na alteração na quantidade de luz natural disponível no interior dos ambientes.

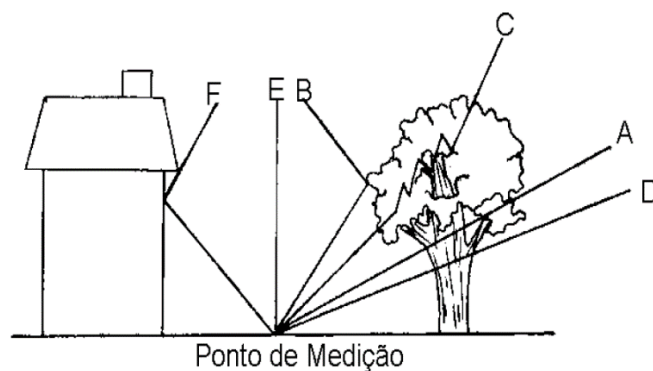
Os fatores que influenciam a disponibilidade da luz natural são diversos. Dentre eles, podemos destacar a obstrução do entorno, variável de grande impacto em áreas densamente urbanizadas. O planejamento da luz natural exige atenção especial ao efeito das obstruções circunvizinhas: mesmo em áreas pouco urbanizadas, elementos naturais, como a vegetação arbórea, podem provocar uma obstrução considerável, que se traduz na alteração na quantidade de luz natural disponível no interior dos ambientes (HOPKINSON *et al.*, 1975).

Apesar de existir uma grande variedade de estudos que tratam do impacto que a arborização urbana tem sobre a redução da radiação solar disponível em ambientes fechados (BARTHOLOMEI, 2003; SHASHUA-BAR e HOFFMAN, 2000; RIGITANO, 2004; PIVETTA, 2010 E BERRY, R.; LIVESLEY, S. J.; AYE, L., 2013), em relação à iluminação natural, há relativamente poucos estudos que investigam as árvores como elementos de controle da luz do dia em ambientes internos.

Yates e McKennan (1989) ressaltam o uso positivo do sombreamento em locais de intensa radiação solar direta e exemplifica com valores da densidade visual de diversas árvores. Comentam ainda sobre a grande variedade de técnicas de medição da atenuação luminosa obtidas e os parâmetros medidos, dentre eles, os métodos que utilizam a radiação solar, a iluminância e a densidade de obstrução física das árvores. Também salientam sobre a dificuldade das medições deste tipo, afirmando que não há uma maneira simples de efetuar-las, devido à grande gama de variáveis envolvidas.

Os autores ilustram os possíveis caminhos da iluminação difusa da abóbada celeste nas árvores e no ambiente construído, na escala do edifício (Figura 8). Os caminhos identificados são: A – Penetração da luz direta nos vazios dos galhos e folhas; B – A reflexão da luz pela árvore; C – Penetração da luz refletida internamente nos galhos da árvore; D – Iluminação transmitida através das folhas; E – Iluminação refletida pelo albedo do solo para o hemisfério superior da abóbada celeste; F – Iluminação refletida pelo albedo do solo para edificação.

Figura 8 – Representação esquemática dos caminhos da luz difusa através da árvore



Fonte: Yates e McKennan (1989).

O estudo de Hongbing *et. al.* (2010) verificou a relação entre a altura de árvores e a distância aos edifícios, levando em conta a iluminação natural. Foram estudados três casos com diferentes configurações entre edifícios e espaços verdes na cidade de Xangai. Para cada caso, verificaram-se diferentes limites de altura de árvore de acordo com a forma da copa (cilíndrico, cônico, esférico e cônico invertido). Os autores chegaram a um modelo matemático que permite

determinar tipos arbóreos ideais a serem plantados entre diferentes configurações de edifícios, onde é possível prever os efeitos da futura árvore sobre a iluminação natural no interior de edificações.

Chaiyakul (2004), partindo do pressuposto de que as árvores no meio urbano são importantes para o conforto térmico, no entanto elas reduzem significativamente a incidência da luz natural nas superfícies e as inter-reflexões, descreve um método de cálculo para estimar a luz do dia em cânions urbanos com a presença de árvores sob várias condições de céu. A vantagem é que simples ajustes podem ser feitos para encontrar o efeito de outras obstruções no cânion urbano. Em termos de planejamento urbano, quando são conhecidas as condições, o autor afirma que este método pode produzir bons resultados para um estágio inicial de projeto. A validação do método é dada mediante comparações entre os valores modelados e os valores obtidos a partir de medições de campo.

Em cidades com presença de árvores urbanas, a iluminação incidente sobre as superfícies verticais dos edifícios não apenas está condicionada pelas características da morfologia urbana, mas também pela presença de árvores e seus períodos de folheação, convertendo-se em elementos de mitigação sazonal dos espaços (CÓRICA; PATTINI, 2012).

Ainda segundo este estudo, as autoras fazem uma abordagem do potencial da luz natural incidente sobre as fachadas de uma via urbana arborizada na cidade de Mendonça para as estações críticas do ano (verão e inverno). Concluiu-se que, em cidades como esta, com grande disponibilidade de luz natural e a forte presença de árvores, o acesso à luz natural se dá por duas formas diferenciadas: 1 – disponibilidade da luz abaixo das copas das árvores e 2 – disponibilidade lumínica acima da copa das árvores, ambas variando conforme a orientação. As autoras salientam, ainda, que esta divisão de categorias de acesso à luz natural modifica as opções de sistemas de luz natural recomendadas para iluminar naturalmente os espaços, definindo-se, para a categoria 1, os sistemas para luz difusa e, para a categoria 2, os sistemas de iluminação natural que controlam a luz solar direta.

De acordo com Al-Sallal (2009), a luz natural admitida no interior dos ambientes deve ser difundida por meio da luz difusa refletida no teto. Caso isso não seja possível, a luz natural deve ser filtrada antes de entrar no ambiente. Neste sentido, as plantas podem proporcionar sombra e melhorar a qualidade da luz do dia que entra através de janelas, espalhando a luz direta e reduzindo a sua intensidade enquanto modera o brilho vindo do céu. Portanto, a qualidade da luz do dia é alcançada por meio do bloqueio da luz solar direta, enquanto promove a luz natural refletida.

Durante e Nogueira (2013), em seu estudo, afirmam que, tendo em vista cidades com

grande disponibilidade de luz natural, é possível dimensionar as aberturas e a vegetação de sombreamento quanto ao seu porte, posicionamento e qualidade de sombra, considerando-se sistemas de iluminação artificial integrados, de forma a compensar, em determinados horários, as perdas de luz natural oriundas do sombreamento.

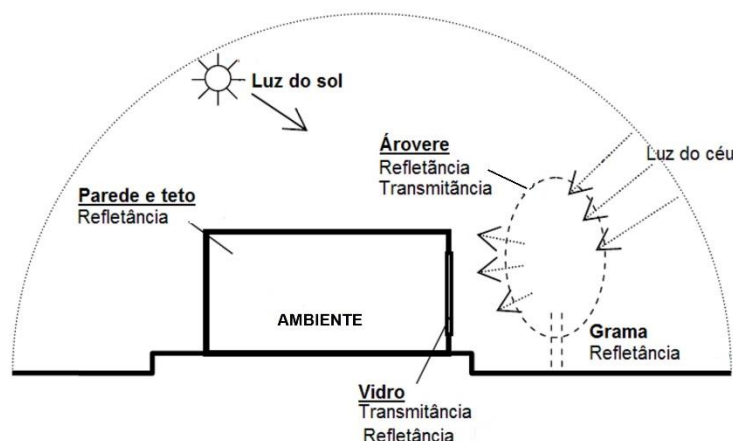
Neste mesmo estudo, os autores avaliaram os efeitos do sombreamento arbóreo nas condições térmicas e lumínicas de ambientes externos e internos de edificações por meio de medições de variáveis como a iluminância a céu aberto, sob a copa de árvores e no interior de ambientes sombreados e não sombreados por duas espécies arbóreas: o oiti e a mangueira. Verificaram que ocorreu perda de iluminação natural dos ambientes sombreados por ambas as árvores: o oiti foi responsável por 48%, e a mangueira, por cerca de 82%.

Seguindo esta mesma linha de pesquisa, Al-Sallal (2007) investiga, em seu estudo, o uso de espécies arbóreas locais nos Emirados Árabes, para melhorar a qualidade da luz natural e a performance visual em salas de aulas. Para a análise, foi observado, mediante simulação com o Radiance, o efeito de duas variáveis: o tipo de árvore e o espaçamento entre elas. Foram observados os níveis e a qualidade de iluminação natural e questões relacionadas ao conforto visual. Para as simulações sem a presença de árvores, o autor identificou três fontes de desconforto visual: altos níveis de contraste, brilho excessivo vindo da janela e distribuição desigual da luz no espaço. Com a inserção das árvores próximas às janelas, observou-se que elas apresentaram um grande potencial para mitigar o desconforto visual em relação a estes três fatores, embora tenham reduzido em cerca de 23% a quantidade de luz natural.

Contudo, para simular um ambiente iluminado naturalmente com o efeito de árvores usando *softwares* como Daysim, Radiance, dentre outros, faz-se necessário utilizar um modelo tridimensional de árvore apropriado, de modo a representar bem o tipo arbóreo a ser utilizado. Para tanto, várias características devem ser conhecidas, como o tamanho da árvore, o índice de área foliar e a refletância das folhas.

Neste sentido, como ilustrado na Figura 9, Al-Sallal (2007) afirma que a transmitância de radiação solar através da copa das árvores é determinada principalmente por: I) quantidade de radiação solar acima da copa da árvore; II) propriedades ópticas da folha da árvore e das superfícies adjacentes; III) arquitetura da copa, incluindo o tamanho, a orientação e a distribuição das folhas.

Figura 9 – Intercepção da radiação solar através da copa arbórea



Fonte: Adaptado de Al-Sallal, 2007.

Na condição de céu nublado, a transmitância da radiação solar depende do tamanho da copa e da distribuição angular da folha, mas, nos dias claros, fatores adicionais que envolvem a posição do sol em relação à árvore e a transferência de feixes de radiação solar direta devem ser considerados (ABRAHA e SAVAGE, 2010 *apud* AL-SALLAL e AL-RAIS, 2013).

Al-Sallal e Al-Rais (2013) desenvolveram um método que ajuda a demonstrar o efeito de árvores sobre o desempenho da iluminação natural no interior de edificações, usando modelos matemáticos. O método requer o cálculo da densidade de área foliar observada na distribuição de fração de lacuna em função do ângulo zenital. Na pesquisa, dois conjuntos de árvores foram estudados: um grupo de árvores de porte pequeno e um grupo de porte grande. A partir de fotografias hemisféricas, obtiveram-se os valores de fração de lacuna para cada copa.

Os resultados ajudaram a desenvolver um modelo 3D de árvore, o qual foi usado para simular o efeito de interceptação da árvore na luz do dia. O modelo de copa estimado foi simulado, utilizando Radiance, e os resultados foram validados por meio da comparação com medições reais de iluminância, realizadas em campo. Os resultados mostraram que há expressiva concordância entre os níveis de iluminância medidos e simulados.

Reza e Mistrick (2021) afirmam que a precisão das simulações de iluminação natural para o ambiente construído depende fortemente da modelagem do ambiente exterior. A prática de modelar um espaço com uma superfície plana do solo com pouco ou nenhum elemento arquitetônico ou paisagístico externo, particularmente no início da fase de projeto, é frequentemente aplicada. Estes autores realizaram um estudo no qual vários níveis diferentes de detalhe para modelar o entorno exterior foram investigados comparando medições com resultados de simulações correspondentes. Os resultados desse estudo revelaram que ignorar

objetos externos circundantes produziu um erro médio de 67,9%, enquanto um alto nível de detalhe (que aplicou representações da vegetação) resultou em um erro médio de apenas 11,3%. Um modelo detalhado do entorno com o método sugerido pela IES LM-83 de modelagem de árvores resultou em um erro médio de 22,8%.

Pan e Jakubiec (2021) desenvolveram um método de criação de modelos de árvores detalhados e sazonalmente variáveis que integram a fração de lacuna, a queda sazonal das folhas, o crescimento e os períodos de mudança de cor, bem como dimensões e alturas das copas das árvores. Os resultados dessa pesquisa provam que a seleção dinâmica de árvores pode afetar os resultados da simulação de luz do dia e energia, devido a diferentes dimensões do dossel, frações de lacuna e cronogramas de queda e rebrota foliar.

Árvores urbanas, em termos de luz natural, comportam-se como um sistema de controle solar, sendo a difusão, a reflexão e a obstrução os três fenômenos mais utilizados em técnicas de controle solar (VILLALBA; PATTINI, 2014). Foi com base nesta hipótese que os autores desenvolveram um estudo que procura verificar a qual destes sistemas um modelo de copa de árvore melhor se ajusta. A metodologia do estudo baseou-se na simulação computacional da luz natural de modelos de copas gerados a partir de fotografias hemisféricas. Fizeram-se comparações entre dados de iluminância vertical medidos *in loco* e os obtidos por meio das simulações para cada um dos modelos. Os autores concluíram que o modelo (grelha) que representa o sistema de reflexão foi o que melhor se ajustou à situação real.

2.1.6 CONSIDERAÇÕES SOBRE O TEMA

No contexto atual de rápida urbanização e mudança climática, o plantio de árvores nas cidades tem sido anunciado como uma solução baseada na natureza que pode ajudar a mitigar a mudança climática (CHENG *et al.*, 2021, ESCOBEDO *et al.*, 2019, GULSRUD *et al.*, 2018), além de proporcionar múltiplos benefícios às pessoas e ao meio ambiente, incluindo mitigação de ilhas de calor urbanas, melhorias na qualidade do ar, atenuação da radiação solar e da iluminação excessiva, regulação de águas pluviais, provisão de *habitat* para a vida selvagem, promoção da saúde humana e impacto benéfico nos valores das propriedades, dentre outros.

As árvores urbanas têm atraído o interesse da pesquisa acadêmica de uma ampla gama de disciplinas de ciências naturais e sociais, como já explorado anteriormente neste capítulo, incluindo: arboricultura, silvicultura, ciência ambiental, ecologia, energia, geografia, planejamento/arquitetura da paisagem e economia. Essa diversidade pode refletir a natureza complexa dos serviços de árvores urbanas e suas implicações abrangentes para ambientes

construídos. O diverso interesse interdisciplinar nas árvores urbanas também explica, em parte, por que diferentes estudos usaram diferentes métodos de campo, refletindo predileções e preconceitos.

Os estudos identificados no escopo desta pesquisa concentram-se em uma série de benefícios que as árvores urbanas podem proporcionar para os residentes urbanos, incluindo benefícios sociais, econômicos, ambientais, de saúde, visuais, estéticos e outros. Estes benefícios podem melhorar a qualidade de vida de cidades por meio do fornecimento de sombra, melhoria da qualidade do ar e conectividade de habitat e paisagem para a fauna urbana. No geral, a pessoas expressam uma visão positiva das árvores nas ruas, com a maioria acreditando que os benefícios das árvores superam seus impactos negativos.

É importante que mais pesquisas envolvendo árvores urbanas ganhem uma atenção especial em todo o mundo, pois a melhor compreensão do efeito cumulativo dos benefícios, dos serviços e desserviços das árvores urbanas, das percepções dos residentes e do poder administrativo e do impacto dessas percepções para os tomadores de decisão e autoridades locais pode ter um impacto significativo para as cidades futuras, frente às mudanças climáticas que o planeta Terra vem experimentando nas últimas décadas.

2.2 Inserção da vegetação na simulação: técnicas de mapeamento e reconstrução virtual da vegetação

Este tópico tem como objetivo identificar os métodos baseados em tecnologias digitais para o mapeamento e a reprodução da vegetação em ambiente virtual, assim como identificar as possibilidades de aplicação dessas técnicas na simulação computacional da edificação, considerando a presença de elementos arbóreos.

A reconstrução tridimensional de árvores é relevante para diversas áreas de conhecimento: botânica, silvicultura, meio ambiente, planejamento urbano. A inserção da vegetação na simulação de desempenho da edificação permite, especialmente, prever os seus impactos sobre variáveis térmicas e lumínicas. Contudo, a modelagem 3D de estruturas arbóreas inclui inúmeras variáveis: a geometria e a dimensão da copa; a dimensão e a forma do tronco, ramos e galhos; a quantidade, a forma, a dimensão, o espaçamento e o ângulo de inclinação das folhas; os índices de refletância, a opacidade e a transparência, a cor, a rugosidade, etc. Portanto, representar árvores reais por construção virtual é uma tarefa árdua e desafiadora, devido à complexidade geométrica dos elementos que a compõem, além da dinâmica de um elemento vivo.

Considerando os métodos de predição do desempenho da luz natural, como a simulação computacional, é fácil antecipar muitas dificuldades de modelagem tridimensional de todos os elementos intervenientes na reprodução da luz. Para Villalba e Pattini (2014), os principais fenômenos de interferência da luz que atravessa um elemento arbóreo são a difusão, a reflexão e a obstrução.

A descrição da arquitetura vegetal é, frequentemente, usada pelos cientistas para modelar a estrutura das plantas ou diferentes processos, bem como interações com outras espécies ou geralmente com o meio ambiente (GAZDA; KEDRA, 2017). Godin (2000) define o conceito de “arquitetura” da planta como “qualquer descrição individual baseada na decomposição da planta em componentes, especificando seu tipo biológico e/ou sua forma e/ou sua localização/orientação no espaço e/ou a maneira como esses componentes estão fisicamente relacionados entre si”.

Para Bournez *et al.* (2019), as funções (transmitância, refletância e absortância da luz) das árvores dependem da distribuição espacial das folhas. Um método eficiente de reconstrução de árvores deve, portanto, ser capaz de reproduzir a área da superfície da folha e sua distribuição dentro de uma copa, tanto quanto possível.

Do ponto de vista da modelagem planta-atmosfera, uma árvore pode ser vista como uma superfície 2D que sombreia uma fração do solo. Essa superfície sombreada é capaz de emitir radiação, liberar vapor de água e emitir a componente refletida da luz a uma dada taxa que se correlaciona com a permeabilidade ou Índice de Área Foliar (IAF) da copa (BOURNEZ *et al.* 2019). Ainda segundo estes autores, uma árvore também pode ser considerada como um objeto 3D, com uma reconstrução que pode variar de simples formas tridimensionais geométricas, como esferas, cubos e pirâmides, conforme observado na pesquisa de Al-Sallal e Al-Rais, (2013), como também para uma reconstrução 3D detalhada da estrutura ramificada e folhas, visto nas pesquisas de Côté *et al.*, (2009), Miller *et al.*, (2015) e Indirabai *et al.*, (2019).

A reconstrução da vegetação requer o uso de técnicas de aquisição 3D específicas. Dois grupos principais de técnicas para a aquisição de nuvens de pontos tridimensionais de elementos arbóreos se destacam: técnicas de escaneamento a laser e técnicas fotogramétricas.

As técnicas não destrutivas para a medição das características estruturais da copa de árvores empregam diferentes métodos para diversos fins: florestais (WALLACE *et al.*, 2016), agrícolas (MOORTHY *et al.*, 2011), ecológicos (TAO *et al.*, 2015), silvicultura (SUÁREZ *et al.*, 2005), planejamento urbano (YAO e WEI, 2013). Há pouca ênfase nas revisões de literatura comparativa das técnicas, sendo que se destaca (ROSELL; SANZ, 2012) nos últimos 20 anos.

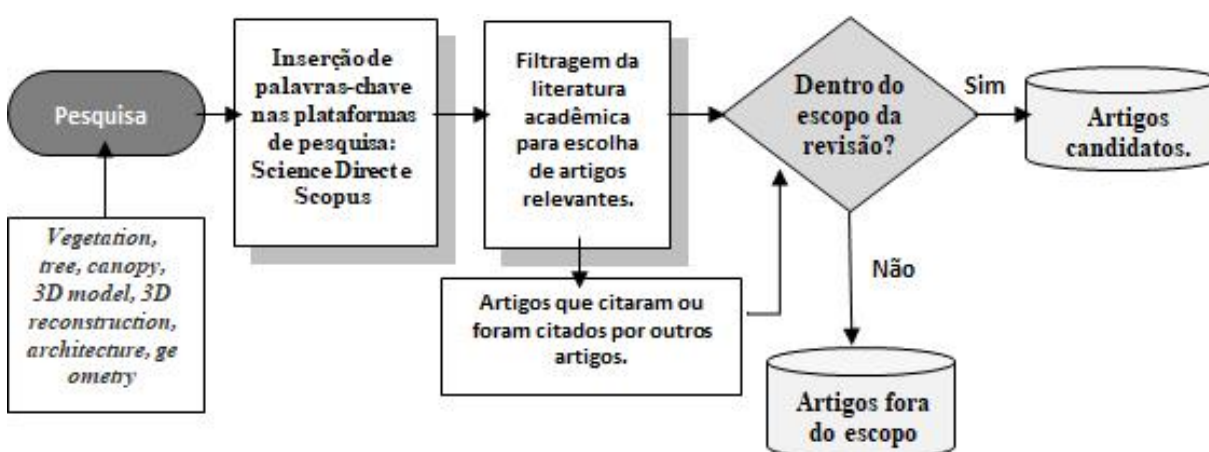
2.2.1 PESQUISA E SELEÇÃO DE ESTUDOS

Nesta seção, discute-se o método utilizado para conduzir esta revisão. A revisão foi realizada com base nas diretrizes PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*). O PRISMA serve de suporte para autores, auxiliando nos relatos de resultados de revisões sistemáticas e meta-análises de forma mais completa e transparente.

Este estudo utilizou dois bancos de dados bibliográficos para extrair os documentos relevantes: o Science Direct e o Scopus. Combinações de palavras-chave, como *3D reconstruction*, *three-dimensional*, *3D model*, *tree*, *canopy*, foram usadas para pesquisar as referências do ano de 2000 até o ano de 2021. Os critérios de inclusão utilizados na pesquisa foram: 1) elementos vegetais como objeto de pesquisa; 2) diferentes técnicas de reconstrução tridimensional de árvores ou outros tipos de vegetação; 3) reconstrução 3D de vegetação, especialmente árvores.

A Figura 10 apresenta o fluxograma que descreve as etapas de seleção e categorização da literatura acadêmica relacionada ao escopo da pesquisa. Primeiro as palavras-chave previamente definidas foram inseridas nas plataformas de pesquisas. Em seguida, os artigos foram filtrados conforme o escopo da revisão. Os artigos que apresentaram os termos pesquisados em seu título, resumo ou palavras-chave foram classificados por ano da publicação, conforme Quadro 1.

Figura 10 – Etapas de seleção e categorização da literatura acadêmica relacionada ao escopo da pesquisa



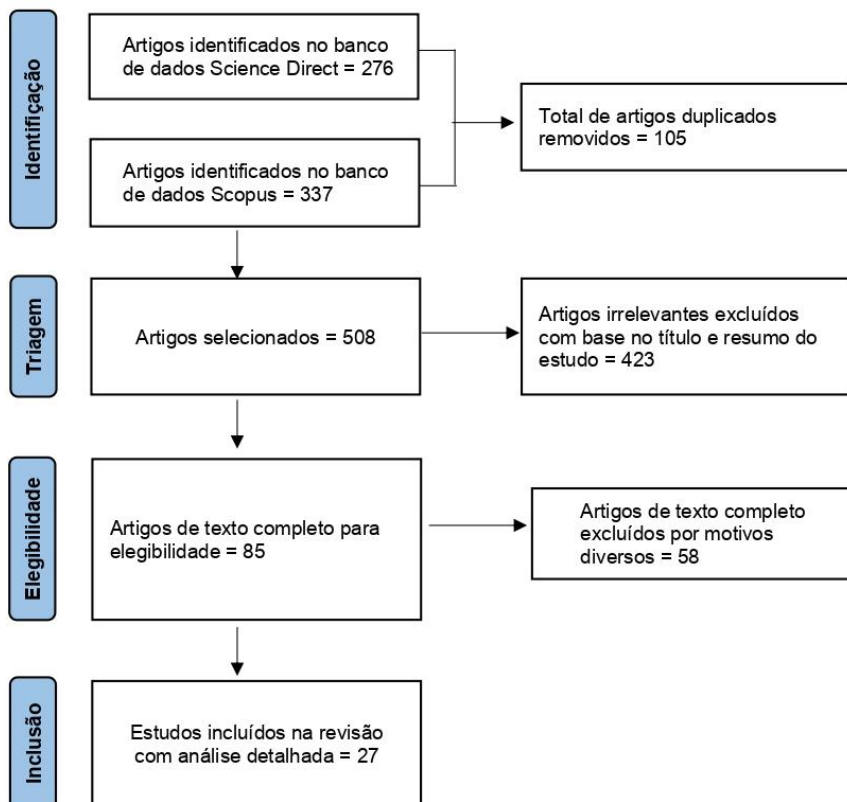
Fonte: dados da pesquisa, 2023

Tabela 1 – Distribuição do resultado das pesquisas ao longo dos anos em função das palavras-chave pesquisadas

Base de dados	Palavras-chave pesquisadas	Ano de publicação					Total
		2000-2005	2006-2010	2011-2015	2016-2020	2021	
SCIENCE DIRECT	"3D reconstruction" AND (tree OR canopy)	5	2	11	30	3	51
	tree OR canopy) AND "three-dimensional reconstruction"	1	1	2	4	3	12
	(tree OR canopy OR vegetation) AND "3D model"	12	29	51	67	11	170
	(tree OR canopy) AND (architecture OR geometry) AND "3D modeling")	3	4	16	21	1	43
SCOPUS	"3D reconstruction" AND (tree OR canopy)	3	14	24	35	5	81
	tree OR canopy) AND "three-dimensional reconstruction"	1	3	6	14	1	25
	(tree OR canopy OR vegetation) AND "3D model"	12	26	53	91	8	190
	(tree OR canopy) AND (architecture OR geometry) AND "3D modeling")	1	5	8	23	4	41

Fonte: dados da pesquisa, 2023.

Figura 11 – Fluxograma de identificação e seleção dos artigos para revisão sistemática



Fonte: dados da pesquisa, 2023, com base no Fluxograma do PRISMA.

Três rodadas de pesquisa bibliográfica foram realizadas para identificar os artigos-alvo: revisão do título, revisão do resumo e revisão do texto completo, conforme esquema da Figura 11. No total, foram identificados, inicialmente, 613 artigos não repetitivos, dos quais 27 foram selecionados. Quatro vertentes de informação foram extraídas dos artigos selecionados: o perfil bibliográfico básico, técnica de reconstrução tridimensional aplicada, modelagem da vegetação, validação do modelo. Os estudos selecionados concentram-se, principalmente, na América do Norte, na Europa e na Ásia.

2.2.2 TÉCNICAS DE MAPEAMENTO DAS CARACTERÍSTICAS ESTRUTURAIS DE ÁRVORES

As principais técnicas utilizadas recentemente podem ser categorizadas em: sensores ultrassônicos, fotografias digitais, sensores a laser, sensores de luz, imagens estéreo, imagens de radar de alta resolução e tomografia computadorizada (ROSELL; SANZ, 2012).

As duas principais técnicas identificadas, apresentadas no Quadro 2, são detalhadas nos subitens a seguir. Primeiro, aborda-se o estado da arte sobre as técnicas de escaneamento a partir de veículos aéreos não tripulados e escaneamento a laser terrestre, ambas baseadas na tecnologia LiDAR (*Light Detection And Ranging*). No item seguinte, apresentam-se diversos estudos que adotaram a técnica Structure from Motion, baseada em fotogrametria.

Quadro 2 – Estudos selecionados e categorizados por técnica utilizada

TÉCNICA	DESC. DA TÉCNICA	FINALIDADE DO MODELO	ESTUDOS IDENTIFICADOS
Escaneamento a Laser	LiDAR Terrestre	Demonstrar o método de reconstrução 3D.	Bailey e Ochoa, 2018 Barnea e Filin, 2012
		Prever as taxas de transpiração de árvores isoladas a partir de diferentes modelos 3D.	Bournez <i>et al.</i> , 2019
		Extrair atributos como o volume da madeira (incluindo caule e galhos), diâmetro na altura do peito e altura da árvore.	Fan <i>et al.</i> , 2020
		Utilizar em modelos de transferência radiativa	Janoutová <i>et al.</i> , 2019
		Analisar o efeito de resfriamento da vegetação.	Kong <i>et al.</i> , 2016
		Extrair atributos das árvores.	Raunonen <i>et al.</i> , 2013
		Gerar medições quantitativas de expoentes de escala metabólica.	Lau, 2019
		Modelar o regime de radiação interna do dossel arbóreo.	Leeuwen <i>et al.</i> , 2013
		Caracterizar a copa e estimar volume e métricas lineares das árvores.	Moorthy <i>et al.</i> , 2011
		Calcular a extinção de luz dentro da copa.	Kükenbrink, 2021
	LiDAR terrestre e Estatísticas Alométricas	Comparar o nível de detalhamento entre modelos.	Bournez <i>et al.</i> , 2016

	LiDAR Terrestre e algoritmo	Demonstrar as limitações do uso de conjuntos de dados LiDAR Terrestre.	Côté <i>et al.</i> , 2011
		Estimar o índice de área foliar.	Indirabai <i>et al.</i> , 2019
		Simular o sombreamento das árvores.	Reckziegel <i>et al.</i> , 2021
	LiDAR Terrestre e Aéreo	Recuperar as principais características arquitetônicas da árvore.	Côté <i>et al.</i> , 2012
	LiDAR Aéreo	Obter dados alturas de árvores individuais.	Cunha Neto <i>et al.</i> (2021),
		Determinar parâmetros geométricos de árvores.	Hadas <i>et al.</i> , 2019
Fotogrametria	SfM	Estimar volume e métricas lineares das árvores.	Aicardi <i>et al.</i> , 2015
		Recuperar as principais características arquitetônicas da árvore.	Dandois e Ellis, 2010
		Abordagem multitemporal para estudar a evolução das oliveiras.	Jurado <i>et al.</i> , 2020
		Demonstrar a precisão do modelo.	Liang <i>et al.</i> , 2014 Huang <i>et al.</i> (2019)
	SfM e algoritmo de classificação	Recuperar as principais características arquitetônicas da planta.	Moriondo <i>et al.</i> , 2016
	SfM-MVS	Recuperar as principais características arquitetônicas da árvore.	Liu <i>et al.</i> , 2021
		Estimar volume e métricas lineares das árvores.	Miller <i>et al.</i> , 2015
		Recuperar as principais características arquitetônicas da árvore.	Morgenrotha e Gomez, 2014

Fonte: dados da pesquisa, 2023.

2.2.2.1 Escaneamento a laser – Tecnologia LiDAR

A varredura a laser foi aplicada pela primeira vez para caracterização de copas arbóreas há algumas décadas (Nelson *et al.*, 1984). É um método bastante utilizado para fazer medições da estrutura da vegetação arbórea no espaço tridimensional e analisar os recursos florestais, como eset aludado por Dandois e Ellis (2010); White *et al.* (2013) e Martins Neto *et al.* (2013).

A varredura a laser utiliza tecnologia LiDAR, que se trata de um sensor remoto ativo a bordo de plataformas (tripuladas ou não tripuladas) para determinar a distância de um objeto medindo as propriedades da luz refletida nele. A distância ao objeto ou superfície é calculada medindo o atraso de tempo entre a transmissão do laser e a recepção do sinal refletido (LIM *et al.*, 2003 e LI *et al.*, 2014).

Esta tecnologia é muito adequada em aplicações florestais, pois tem capacidade de mobilização de uma grande quantidade de pontos com alta precisão e alta velocidade de aquisição de dados de estruturas complexas, como as de elementos arbóreos. Diversos estudos já indicaram a tecnologia LiDAR como uma ferramenta promissora para a obtenção de parâmetros estruturais de árvores, como observado em pesquisas como as de Moorthy *et al.* (2011), Raumonon *et al.* (2013) e Fan *et al.* (2020).

Os sistemas LiDAR podem ser classificados com base na plataforma usada (Beland *et*

al.2019): varredura a laser aerotransportada a partir de uma aeronave tripulada (ALS – *Airborne Laser Scanning*); varredura a laser a partir de veículos aéreos não tripulados (ULS – *Unmanned Aerial Vehicle*); varredura a laser terrestre a partir de um sistema estático de plataforma terrestre (TLS – *Terrestrial Laser Scanning*); varredura a laser móvel a partir de uma plataforma terrestre móvel (MLS – *Mobile Laser Scanning*) e LiDAR de vôo espacial (SLS – *Spaceflight Lidar*).

Neste artigo, são abordados os sistemas de varredura a laser aéreo não tripulado e varredura a laser terrestre. Baseado em Beland *et al.* (2019), são apresentados, no Quadro 3, as principais vantagens e desvantagens dos sistemas LiDAR para mapeamento de ambientes com a presença de elementos arbóreos.

Quadro 3 – Principais vantagens e desvantagens dos sistemas LiDAR para mapeamento de ambientes com a presença de elementos arbóreos

	VANTAGENS	DESVANTAGENS
Varredura a laser de veículos aéreos não tripulados – ULS	● Aumento significativo no nível de detalhe da estrutura interna da copa da árvore em comparação com o sistema ALS. ● Potencialmente mais barato do que as aquisições de ALS. ● Pode ser adquirido junto com dados multiespectrais ou hiperespectrais de alta resolução.	● A varredura da área é significativamente menor do que para o sistema ALS. ● Regulamentação governamental pode limitar o uso deste sistema em alguns ambientes, especialmente em florestas densas. ● A coleta de dados precisa ser terceirizada e o número atualmente limitado de provedores de serviços resulta na indisponibilidade do serviço em determinadas áreas.
Varredura a laser terrestre – TLS	● Cobertura na escala da árvore. ● Fornece informações detalhadas sobre a estrutura da copa da árvore. ● É possível separar a madeira do material foliar nos dados ● Pode fornecer o índice de área foliar mais preciso, como também a distribuição da folhagem no espaço tridimensional. ● Uso em estudos do ambiente de luz dentro da copa, relacionando estrutura com função. ● Potencial para estimar aglomeração de folhagem com base na interceptação de luz.	● Cobertura espacial limitada. ● Possíveis lacunas nos dados, particularmente no alto da copa. ● Os métodos de campo são complexos, particularmente logística e alinhamento de múltiplas varreduras para um sistema de referência de posicionamento comum. ● Dados 3D brutos podem ser complexo de trabalhar e nem sempre são compatíveis com GIS

Fonte: adaptado de Beland *et al.* (2019).

2.2.2.1.1 Escaneamento a partir de veículos aéreos não tripulados – ULS

Os sistemas lidar aerotransportados têm sido cada vez mais usados em áreas florestais, a exemplo das pesquisas de Bater *et al.* (2011) e Budei *et al.* (2018), garantindo a cobertura de uma grande área em um único voo. No entanto, seus custos são elevados, pois o levantamento

depende dos serviços de empresas proprietárias de aviões para realizar a coleta de dados.

As plataformas de veículos aéreos não tripulados são pilotadas remotamente ou autonomamente. Estes representam uma oportunidade de baixo custo, agilidade e autonomia para a coleta de dados. O uso de ULS para a gestão de recursos naturais está aumentando, especialmente na última década, como demonstrado por Shahbazi *et al.* (2014), os quais apresentam uma revisão abrangente das aplicações de imagens aéreas não tripuladas para o manejo de recursos agrícolas e naturais.

Estudos recentes vêm associando dados LiDAR e tecnologias de ULS, resultando em uma combinação de dados de resolução muito alta em escalas locais a regionais a um custo de pesquisa significativamente menor em relação ao LiDAR aerotransportado (WALLACE *et al.*, 2012). Alguns pesquisadores direcionaram seus esforços para sugerir abordagens de modelagem para florestas urbanas usando dados LiDAR ou integrando LiDAR com imagens ópticas, como observado nos estudos de Holopainen *et al.* (2013), Liu *et al.* (2013), Saarinen *et al.* (2014) e Wu *et al.* (2013).

Cunha Neto *et al.* (2021) aplicaram a tecnologia LiDAR-ULS para obter dados geométricos de árvores individuais em florestas urbanas para derivar alturas individuais de árvores. As alturas das árvores derivadas do LiDAR – ULS e baseadas no campo foram comparadas por análise estatística, e os resultados demonstraram que maiores densidades de pontos permitiram uma melhor descrição dos perfis das árvores.

O estudo de Hadas *et al.* (2019) demonstra um experimento que determina parâmetros geométricos selecionados de macieiras, com base em uma nuvem de pontos de alta densidade obtida a partir de um sistema LiDAR – ULS. A abordagem desenvolvida permitiu a identificação de 99% das árvores. Os autores concluem que um sistema LiDAR – ULS pode atender à necessidade de inventário remoto de pomares devido à alta qualidade dos dados adquiridos, à flexibilidade das medições, à automação total do voo e ao menor custo dos sensores.

2.2.2.1.2 Escaneamento a laser a partir do solo – TLS

Os instrumentos de varredura terrestre (LiDAR terrestres) são unidades compactas que podem ser montadas em um tripé e são usadas para medir a distância dos objetos ao seu redor. O escaneamento terrestre é uma contraparte do LiDAR aéreo e pode medir a estrutura da vegetação em 3D com precisão milimétrica.

O escaneamento a laser terrestre vem sendo cada vez mais usado para extrair vários

atributos de vegetação. Os estudos iniciais focaram na extração de atributos de árvores em nível de parcela, como a pesquisa desenvolvida por Côté *et al.* (2012), principalmente devido ao intenso trabalho manual necessário para identificar e extrair árvores individuais da maciça nuvem de pontos.

O desenvolvimento de algoritmos de segmentação de árvore, como observado no estudo de Raunonen *et al.* (2015), vem auxiliando na extração semiautomática de árvores individuais e permitindo a coleta de dados em nível de árvore. Desta forma, o escaneamento terrestre é uma alternativa promissora para coletar grandes quantidades de dados sem amostragem destrutiva em várias escalas espaciais e temporais.

Bailey e Ochoa (2018) desenvolveram um método para reconstruir árvores para especificar a posição, orientação e tamanho de cada folha em modelos de árvores digitais que fornecem entradas geométricas para modelos ou análises biofísicas de alta resolução. Os autores denominaram o método de semidireto porque usa um procedimento de triangulação para reconstruir as folhas que estão à vista do scanner. Para as folhas obstruídas, um procedimento estatístico de preenchimento foi usado. Este método não depende da matéria lenhosa da planta para fornecer um esqueleto para reconstrução e pode ser usado em plantas densas, nas quais é visível pouca matéria lenhosa.

Barnea e Filim (2018) apresentaram uma estrutura para reconhecimento de objetos por meio de varreduras a laser terrestre. Os resultados demonstraram que a detecção de objetos com alto nível de precisão pode ser alcançada apreendendo as características do objeto a partir de um pequeno conjunto de recursos e um número limitado de amostras. Foram identificadas árvores em diferentes escalas e parcialmente obstruídas por outras árvores.

Com o objetivo de investigar o nível mínimo de detalhe da reconstrução da geometria da árvore necessária para permitir uma estimativa do efeito de resfriamento evaporativo de uma árvore individual, Bounez *et al.* (2019) propuseram um estudo baseado na abordagem Functional Structural Plant Modeling – FSPM (modelo funcional estrutural de planta), que vincula a estrutura de árvore 3D ao seu funcionamento. Com base em dados de nuvem de pontos de varredura a laser terrestre, vários métodos de reconstrução de copa foram considerados. Uma comparação entre as taxas de transpiração fornecidas por essas maquetes mostra que os métodos de reconstrução de estrutura ramificada de árvore têm um desempenho melhor do que os métodos de envelope e que essas diferenças estão relacionadas à propriedade de interceptação de luz das árvores reconstruídas. Este estudo fornece diretrizes para determinar as características estruturais das copas das árvores que devem ser medidas para realizar estimativas às taxas de transpiração de árvores individuais.

Moorthy *et al.* (2011), Raumonon *et al.* (2013) e Fan *et al.* (2020) desenvolveram, com base no escaneamento a laser a partir do solo, metodologias de reconstrução de modelo de estrutura quantitativa que caracteriza parâmetros estruturais de copas de árvores e extrai os seus atributos, como volume, DAP (medida do diâmetro da árvore a 1,30 metros de altura em relação ao nível do solo), altura da árvore.

Kong *et al.* (2016) apresentaram uma técnica para determinar a sombra da copa de árvores usando dados de escaneamento terrestre com o objetivo de analisar o efeito de resfriamento das árvores. As descobertas deste estudo podem ser usadas como um guia para auxiliar na seleção das melhores espécies para planejamento e projeto de espaços verdes urbanos para resfriar o ambiente térmico e aumentar a economia de energia em ambientes urbanos.

Kükenbrink *et al.* (2021) usaram dados de varredura a laser de alta resolução juntamente com medições de propriedades ópticas de folha para parametrizar o modelo de transferência radiativa (DART – *Discrete Anisotropic Radiative Transfer*). A combinação de aquisições de escaneamento a laser de veículos aéreos não tripulados e terrestres permitiu uma reconstrução 3D altamente detalhada de copas florestais. Foi analisado o impacto, tanto em termos de estrutura quanto de propriedades ópticas na condução da radiação fotossinteticamente ativa (PAR – *Photosynthetically Active Radiation*) no espaço tridimensional interno da copa. Os autores concluíram que uma reconstrução florestal tridimensional detalhada é essencial para uma modelagem mais ajustada da distribuição de luz dentro de copas arbóreas.

Bournez *et al.* (2016) abordaram os efeitos da vegetação no clima urbano utilizando um modelo de microclima 3D para quantificar a evapotranspiração das árvores em relação à sua arquitetura, fisiologia e clima. Com base em nuvens de pontos adquiridas com scanner a laser terrestre, realizaram a reconstrução 3D da arquitetura da parte lenhosa da árvore. Em seguida, a reconstrução 3D das folhas foi realizada a partir do esqueleto 3D e procedimentos estatísticos. Neste contexto, estudou-se o nível de detalhamento e precisão do modelo 3D de árvore reconstruído. Os resultados mostraram que modelos mais detalhados (com a presença de brotos e folhas), provavelmente, não são necessários para a modelagem do resfriamento arbóreo urbano. O estudo sugere que devem ser estudados modelos menos precisos da estrutura da árvore, considerando apenas uma casca convexa da árvore com algumas informações adicionais sobre a estrutura da folhagem.

Indirabai *et al.* (2019) reconstruiu árvores tridimensionais por meio de algoritmos de segmentação e calculou o índice de área foliar de árvores individuais por meio do escaneamento a laser terrestre. O método adotado provou que vários outros parâmetros, como DAP e a altura

individual das árvores florestais, podem ser estimados simultaneamente com o uso dessa técnica.

Reckziegel *et al.* (2021) propuseram modelos 3D de árvores para simulação do sombreamento em sistemas agroflorestais e uma estimativa da redução da insolação. Os autores apresentaram um algoritmo de criação de folhas para gerar folhas realistas para modelos de estrutura de árvores reais. O estudo concluiu que o modelo de sombra é uma ferramenta adequada para a quantificação detalhada dos efeitos de sombreamento de árvores isoladas. Os resultados podem ser utilizados para subsidiar a tomada de decisão dos gestores em relação à inclusão de árvores em áreas urbanas, como medida estratégica para melhores condições da vida humana na cidade.

2.2.2.2 Fotogrametria

Fotogrametria é um processo pelo qual imagens ou fotografias são usadas para fazer medições no mundo real. A fotogrametria pode ser usada para gerar dados 3D a partir de uma comparação de imagens 2D. Esse processo fotogramétrico usa imagens obtidas de diferentes pontos de vista para extrair a forma, o tamanho e a posição dos objetos (FABRIS; PESCI, 2005).

A fotogrametria é dividida em aérea e terrestre (JIANG *et al.*, 2008). Na fotogrametria aérea, as imagens são adquiridas por meio de fotos aéreas de uma aeronave tripulada ou não, podendo fornecer mapas topográficos e detalhes do uso do solo. Na fotogrametria terrestre, as imagens são adquiridas em locais próximos ou na superfície da terra e fornecem informações dimensionais detalhadas de um objeto.

Muitas aplicações bem-sucedidas e diversas da fotogrametria de curto alcance têm sido usadas com sucesso em vários estudos que incluem a vegetação (DANDOIS; ELLIS, 2010; MORGENROTHA; GOMEZ, 2014; MILLER *et al.*, 2015; MORIONDO *et al.*, 2016; JURADO *et al.*, 2020). O rápido desenvolvimento da imagem digital e das tecnologias de computador desde o início da década de 1990 tornou a fotogrametria de curto alcance muito mais viável e acessível para aplicações em diversas áreas.

2.2.2.2.1 Estrutura a partir do movimento (*Structure from Motion – SfM*)

A Structure from Motion (SfM) é uma forma avançada de fotogrametria. Foi introduzida pela primeira vez no campo da computação em 1979 (ULLMAN, 1979) e tornou-se uma boa

ferramenta para gerar modelos 3D a partir de imagens 2D, como testado por Dandois e Ellis, 2010, Westoby *et al.* (2012); Dandois *et al.* (2015) e James e Robson (2014). Assim como os sistemas LiDAR, SfM produz nuvens de pontos espacialmente precisas e, portanto, tem o potencial de fornecer estimativas da arquitetura de árvores.

Esta técnica é o resultado de um instrumento de sensoriamento remoto extremamente simples: uma câmera digital comum capturando imagens altamente sobrepostas enquanto se move ao redor ou ao longo de objetos.

O SfM baseado em UAV (Veículo Aéreo Não Tripulado) tem sido bastante utilizado para coletar dados de árvores em uma ampla gama de domínios, como os estudos de Panagiotidis *et al.* (2017), Torres-Sánchez *et al.* (2015) e Tuominen *et al.* (2017). Recentemente, SfM também foi usado com imagens de origem terrestre para criar modelos 3D de árvores em um ambiente de laboratório controlado (MILLER *et al.*, 2015).

As limitações associadas ao SfM são originadas a partir das imagens, ou seja, dos dados de entrada (JAMES; ROBSON, 2014; SALAMÍ *et al.*, 2014; DANDOIS *et al.*, 2015). A qualidade do produto de saída (modelo 3D) é determinada pelos parâmetros das imagens, assim como quantidade e cobertura das imagens. A altura da câmera acima do nível do solo e o ângulo da câmera em relação ao solo também influenciam a qualidade da reconstrução da cena 3D (Dandois *et al.*, 2015). Os fatores ambientais (iluminação e hora do dia) também afetam a qualidade das imagens, pois os níveis de brilho e contraste interferem a capacidade dos algoritmos SfM de localizar recursos nas imagens, e todos estes fatores contribuem para a qualidade do conjunto de dados final (ISIBUE; PINGEL, 2020).

Dandois e Ellis (2010) demonstraram que medições 3D de alta resolução espacial da estrutura da vegetação e características espectrais podem ser produzidas aplicando algoritmos de visão de computador de código aberto a fotografias digitais comuns adquiridas, usando plataformas aéreas de baixo custo. Os resultados obtidos neste estudo confirmam que a visão computacional pode suportar o sensoriamento remoto 3D de alta resolução espacial da estrutura da vegetação.

Jurado *et al.* (2020) propõem uma nova aplicação, que envolve a fusão de imagens multiespectrais e nuvens de pontos a partir da sobreposição de várias imagens de alta resolução. A metodologia é baseada em uma abordagem multitemporal para estudar a evolução das oliveiras. Como resultado, os modelos 3D de oliveiras são caracterizados pela refletância observada no dossel da planta. A morfologia da planta é estudada por uma decomposição

baseada em voxel¹ de sua estrutura 3D para estimar a altura e o volume.

A viabilidade de utilização de nuvem de pontos terrestres, gerada por imagens a partir de uma câmera portátil não calibrada para reconstrução tridimensional de uma parcela de terra contendo árvores e de árvores individuais, foi estudada por Liang *et al.* (2014) e Huang *et al.* (2018). Os resultados obtidos foram comparados com medições de campo e com dados de varredura a laser terrestre, e as principais vantagens dos dados de nuvem de pontos baseados em imagens residem no baixo custo do equipamento necessário para a coleta de dados, nas medições de campo simples e rápidas e no processamento automatizado de dados.

Morgenroth e Gomez (2014) determinaram a altura da árvore, o diâmetro do caule e o volume da copa por meio de SfM. Foram utilizados dois cenários: uma única árvore envasada em um ambiente de laboratório, podendo ser feitas medições manuais, e duas árvores de diferentes espécies e tamanhos em ambientes naturais para testar a viabilidade do método fora do laboratório. Os resultados indicaram que as estimativas de altura das árvores tiveram erro de 2,59%, enquanto as estimativas de diâmetro do caule tiveram erro de 3,70%. Segundo os autores, o método SfM é uma alternativa promissora e barata em relação aos scanners terrestres LiDAR.

Miller *et al.* (2015) testaram o potencial de uso de uma câmera portátil de baixo custo, empregando o método de estrutura a partir do movimento para medir árvores. Os resultados mostram que o SfM é capaz de produzir estimativas de medidas 2D e 3D com precisão comparável à da varredura a laser. Fatores, como a posição da árvore em relação ao seu entorno, a cena de fundo e a iluminação do ambiente, podem afetar o sucesso do modelo. O estudo ressalta que como nenhum equipamento especializado é necessário para o SfM, pode ser utilizado por pessoas com pouca experiência.

Assim como Miller *et al.* (2015), Moriondo *et al.* (2016) testaram o método de SfM para gerar reconstruções 3D de plantas, recuperando as principais características arquitetônicas da planta (área foliar, inclinação da folha, azimuth da folha), diferenciando pela reconstrução dos ramos (galhos), e não da planta como um todo. Os resultados apontaram que o SfM incluído neste método pode fornecer mais informações sobre a análise da arquitetura da planta em termos de uma descrição fiel do azimuth da inclinação da folha.

Aicardi *et al.* (2015) propuseram uma possível integração de nuvens de pontos obtidas por escaneamento a laser terrestre com aquelas coletadas por modelos fotogramétricos 3D

¹ Voxel é o menor ponto tridimensional de uma imagem digital. O nome voxel vem da mistura das palavras volume e pixel.

baseados em imagens SfM capturadas por Veículo Aéreo Não Tripulado (UAV), com o objetivo de criar um conjunto de dados preciso do local da floresta com alta resolução. O resultado obtido com este estudo foi um modelo 3D da área de estudo. Esse modelo pode ser usado em uma ampla gama de aplicações em estudos florestais, como a reconstrução de formas 3D de árvores ou a análise do crescimento das árvores ao longo do tempo.

2.2.3 MÉTODOS DE RECONSTRUÇÃO TRIDIMENSIONAL DE ÁRVORES

Até recentemente, árvores ou qualquer outra vegetação eram meramente consideradas elementos contextuais em ambientes virtuais. Elas, geralmente, eram usadas para adicionar algum realismo visual à cena virtual. No entanto, com a crescente preocupação ambiental, árvores e plantas virtuais recebem atenção crescente, e seu realismo biofísico pode ser tão importante quanto seu realismo visual para aplicações específicas, que vão desde contextos urbanos até os naturais.

Existem vários estudos baseados no processamento de nuvem de pontos para a reconstrução de modelos tridimensionais de árvores, tais como: modelos baseados no ajuste da nuvem de pontos da árvore por geometrias primitivas, como o "SimpleTree" (HACKENBERG *et al.*, 2015), e modelos que introduzem o conceito de esqueleto para descrever a geometria de árvores de forma relevante, como o "SkelTree" (BUCKSCH *et al.*, 2010).

Bournez *et al.* (2019) classificam os métodos de reconstruções tridimensionais de árvores em três grupos: reconstruções de estrutura ramificada; reconstruções de envelope, como envelopes 3D convexos/côncavos e reconstruções por meio de voxels.

O método de reconstrução de estrutura ramificada emprega o princípio de esqueletização da estrutura da árvore e gera modelos 3D mais detalhadas e fiéis à realidade, pois se caracteriza por uma distribuição das folhas ao redor dos brotos (LANDES *et al.*, 2014; BOUDON *et al.*, 2014; ZINE-EL-ABIDINE *et al.*, 2021). Um esqueleto é uma representação compacta e eficiente de uma forma sólida, representando fielmente as formas de geometria e topologia (JIANG *et al.* 2013).

O método baseado em envelope cria uma "casca" convexa ou côncava que envolve a nuvem de pontos levantada da copa da árvore o mais próximo possível (BOURNEZ *et al.* 2019). Depois, as folhas podem ser uniformemente espaçadas no envelope.

No método de reconstrução baseado em voxel, as características das árvores são extraídas independente da reconstrução da árvore, analisando nuvens de pontos 3D e usando algoritmos espacialmente explícitos (HOSOI; OMASA 2006; VONDERACH *et al.* 2012). A

nuvem de pontos da copa da árvore é subdividida em vários voxels de acordo com um determinado tamanho. Os métodos baseados em voxel são ferramentas que possibilitam extrair variáveis significativas de dados de nuvens de pontos que visam descrever a arquitetura e as funções de árvores potencialmente grandes.

Os voxels são empregados para mostrar localmente a nuvem de pontos e derivar a densidade da vegetação ou características relacionadas ao corrigir a oclusão ou heterogeneidade da densidade dos pontos. Também permitem que as nuvens de pontos sejam consolidadas em um objeto volumétrico 3D que pode ser usado para simplificar a geometria da nuvem de pontos e simplificar as análises subsequentes (LECIGNE *et al.*, 2018).

2.2.3.1 Modelagem Funcional-Estrutural de Plantas – FSP

Os modelos de planta virtual, também chamados de modelos de planta funcional-estrutural (do inglês: *Functional-structural plant* – FSP), são modelos de computação que descrevem explicitamente a estrutura 3D das plantas, considerando também os processos fisiológicos e fatores ambientais (GODIN; SINOQUET, 2005; VOS *et al.*, 2010).

Os primeiros modelos de simulação de computador 3D da arquitetura de plantas foram desenvolvidos na década de 1980, como a pesquisa de Reffye *et al.* (1988). No entanto, nenhum processo funcional de planta foi incorporado a esses modelos pioneiros, o que limitou suas aplicações potenciais nas ciências que estudam a vegetação. Para superar essa desvantagem, grandes esforços foram feitos a partir de meados da década de 1990 para desenvolver modelos de planta funcional-estrutural, combinando processos físicos e/ou fisiológicos com descrições explícitas da estrutura da planta, como, por exemplo, os estudos de Godin e Sinoquet (2005), Evers *et al.* (2018) e Bongers (2020).

Os modelos de planta funcional-estrutural possibilitam experimentos e medições virtuais, difíceis de configurar no mundo real devido a restrições de tempo, custo ou viabilidade. O comportamento da luz dentro de copas de árvores, por exemplo, não pode ser medido a partir de sensores de luz distribuídos na copa, enquanto as plantas virtuais possibilitam melhores estimativas da luz em escala intracopa.

As plantas são tratadas como um conjunto de unidades elementares interconectadas. O modelo de planta funcional-estrutural considera que as plantas respondem ao seu ambiente não apenas adaptando suas funções (fotossíntese, transpiração), mas, muitas vezes, também sua estrutura (forma e orientação das folhas), que modifica a condição da luz, por exemplo, em que as funções operam. O FSP permite que os *feedbacks* entre a estrutura e a função sejam

capturados (VOS *et al.*, 2010).

Os modelos FSP podem variar de representações estáticas puramente descritivas de plantas ou copas de plantas a simulações dinâmicas, nas quais a forma e o funcionamento das plantas dependem de fatores abióticos ou bióticos fisiológicos e/ou ambientais subjacentes e suas interações. O nível de realismo, detalhe e os processos incluídos são, normalmente, ajustados para a questão de pesquisa que está sendo tratada com o modelo (EVERS *et al.*, 2018). Os modelos 3D de elementos vegetais, como árvores, podem ser usados como suporte para diversos fins, como na pesquisa desenvolvida por Sarlikioti *et al.* (2011), que estimou a distribuição da luz.

EVERS *et al.* (2018) afirmam que a modelagem FSP é uma abordagem estabelecida que amadureceu ao longo dos anos para se tornar uma ferramenta na análise do crescimento e desenvolvimento da vegetação, impulsionada por processos internos em interação com fatores externos (meio ambiente, gestão e outros organismos, incluindo plantas vizinhas). A modelagem FSP continua se expandindo em novas áreas, inclusive em contextos urbanos (como, por exemplo, a possibilidade de visualizar como será a evolução de um parque depois de alguns anos), prevê o consumo de dióxido de carbono de um conjunto de árvores de uma cidade e simula a atenuação da radiação solar por copas arbóreas, dentre outros.

Na década de 1980, um dos primeiros simuladores de crescimento da arquitetura vegetal foi projetado pelo laboratório AMAP (RERTYE *et al.*, 1988). O conjunto de *software* AMAP continha um simulador de crescimento da arquitetura da planta e um gerenciador de paisagem voltado para computação gráfica. Um grande conjunto de valores de parâmetros foi projetado para várias espécies de plantas (cerca de 660 arquivos de parâmetros) (GRIFFON; COLIGNY, 2012). Foi seguido pelo desenvolvimento do *software* AMAPsim, que introduziu idades fisiológicas para melhorar a precisão botânica.

Simultaneamente, o *software* L-StudioVLab foi desenvolvido por Prusinkiewicz e Lindenmayer (1990) para simular o crescimento da planta com base em L. system. Com esse formalismo, o desenvolvimento das plantas é computado de acordo com um conjunto de regras de reescrita. Outro *software* baseado nos L-systems é o GroIMP, projetado por Kniemeyer e Kurth (2008). É um *software* de código aberto que estende o princípio L-Systems à reescrita geral do gráfico com o seu crescimento relacional.

Posteriormente, a estrutura baseada em componentes OpenAlea foi projetada "para facilitar a integração e interoperabilidade de modelos e técnicas heterogêneas de diferentes disciplinas científicas" (PRADAL, *et al.*, 2008). Seu pacote VPlant é mais dedicado à modelagem de arquitetura de plantas. Toda a plataforma fornece uma interface de programação

visual para construir e conectar uma ampla gama de ferramentas que lidam com modelos de plantas desde o meristema até as escalas de cena, mas também para lidar com análise de dados e processamento de imagens.

O projeto AMAP Studio vem sendo desenvolvido no laboratório AMAP desde o final de 2008 com foco na edição, visualização, exploração e simulação da arquitetura vegetal por meio de uma rica interface gráfica de usuário para uso comum ou por *scripting* para usuários especializados.

Outros *softwares* com menor conhecimento botânico ou outras abordagens podem ser usados para construir estruturas de plantas, Tree Generator, disponível em: <http://andrewmarsh.com/software/tree3d-web/>. Este aplicativo da web gera geometrias de árvores paramétricas simples e leves, porém suficientemente configuráveis para representar razoavelmente o tamanho, a forma e os efeitos de sombreamento dinâmico das árvores existentes ou prováveis em um local. Além disso, é possível representar a variação da cor e a opacidade das folhas ao longo do ano para simular adequadamente os efeitos sazonais dinâmicos das árvores.

2.2.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE O TEMA

A tecnologia LiDAR oferece algumas vantagens em aplicações para mensurar a estrutura da vegetação: velocidade de aquisição de dados, precisão de dados e cobertura em comparação com os métodos tradicionais de obtenção das mesmas informações no campo. Nos últimos anos, a tecnologia LiDAR tem sido amplamente utilizada e tornou-se a fonte de dados padrão para fins florestais e ecológicos em muitos países. No entanto, a aquisição de dados por meio da tecnologia LiDAR requer planejamento e investimento (CUNHA NETO *et al.*, 2021).

Abordagens fotogramétricas para obter informações 3D sobre a estrutura da vegetação vêm se tornando populares, oferecendo economia de custo substancial. A fotogrametria é limitada à reconstrução de superfícies visíveis nos dados de imagem. No entanto, dados fotogramétricos podem ser combinados com aqueles obtidos a partir de LiDAR, por exemplo, para resolver as limitações das técnicas de fotogrametria, como estudado por Wallace *et al.* (2016).

SfM é uma abordagem fotogramétrica que oferece aquisição flexível e econômica. Essa técnica encontrou ampla aplicação e aceitação devido ao seu custo-benefício, com a possibilidade de uso de equipamentos não especializados (câmeras fotográficas de relativo baixo custo) e a disponibilidade de *softwares* de processamento acessíveis e com facilidade de

uso. A larga aceitação da fotogrametria SfM, visualizada a partir do número crescente de publicações científicas na área florestal que utilizam esta técnica, pode ser atribuída ao custo-benefício.

Contudo, algumas restrições precisam ainda ser superadas na SfM. Fatores de influência como o ângulo de visualização, variações na iluminação, condições atmosféricas e sazonais devem ser cuidadosamente consideradas antes do levantamento. Estes fatores refletem diretamente nos dados e, portanto, nas análises finais. Para garantir o uso de dados SfM, permitindo aquisições em diferentes épocas do ano, é fundamental desenvolver protocolos para diversos cenários condicionais e modelos que levem em consideração as variações dos dados. Outra desvantagem da técnica fotogramétrica é a necessidade de muitas imagens, a fim de obter dados suficientes para a reconstrução de apenas uma árvore.

Sobre a reconstrução virtual do elemento arbóreo, destaca-se que, a partir da aquisição de dados de nuvens de pontos, mediante as várias técnicas mencionadas neste capítulo, métodos específicos foram propostos para reconstruir estruturas de elementos arbóreos plausíveis: estrutura ramificada, envelope e voxel. Os melhores resultados, em termos de simulação, são obtidos com um método de estrutura ramificada que permite reconstruir os valores característicos necessários com alta precisão, tais como os estudos de Landes *et al.* (2014), Boudon *et al.* (2014), Bournez *et al.* (2019), Lau *et al.* (2019), Zine-El-Abidine *et al.* (2021).

No entanto, este método de reconstrução apresenta algumas desvantagens, como árvores sem folhas, em vez de árvores com folhas, devendo ser consideradas devido à oclusão da estrutura ramificada pelas folhas. Para reconstruir modelos 3D de árvores com folhas, informações sobre a distribuição da área foliar e a distribuição do ângulo da folha na estrutura ramificada devem ser fornecidas. Por este motivo, como comprovado no estudo de Bournez *et al.* (2019), os métodos de reconstrução com envelopes e voxels devem ser considerados e analisados, mesmo que o desempenho não seja tão eficaz quanto o da estrutura ramificada, pois eles permitem obter maquetes de uma maneira mais fácil e rápida do que com o método de estrutura ramificada.

A modelagem funcional-estrutural de plantas é um conceito relativamente recente. O laboratório AMAP foi o pioneiro na criação de *software* com foco na edição, visualização, exploração e simulação da arquitetura vegetal. Desde então, as ferramentas e conceitos estão em desenvolvimento contínuo. Muitos outros aplicativos vêm sendo criados (*softwares* AMAPsim, AMAPstudio, L-StudioVLab, GroIMP, OpenAlea, Tree Generator), com menor ou maior rigor no conhecimento botânico. A representação modular e realista de plantas em

diferentes escalas hierárquicas é uma característica forte dos aplicativos que simulam a estrutura e o funcionamento da planta, assim como sua interação com o ambiente.

Relativamente, poucas revisões da literatura reuniram e analisaram comparativamente técnicas de medição/mapeamento da vegetação. As técnicas identificadas são promissoras, no entanto, limitações, como precisão, custo de operação, rapidez e compactação (pré-requisitos simultâneos), impedem a utilização desses recursos na simulação da edificação com a presença de elementos arbóreos.

Espera-se que a evolução e o desenvolvimento de novos sensores dedicados à caracterização geométrica de elementos arbóreos permitam avanços significativos e muito necessários na otimização do processo de reconstrução tridimensional de estruturas tão complexas como as árvores.

Sobre os métodos para reconstruir árvores tridimensionais no ambiente virtual, destacam-se, positivamente, os métodos de envelope e voxel, considerando os benefícios relacionados às limitações de processamento.

Sendo assim, com base nesta revisão e por meio de resultados práticos (ver Capítulo 4), foi possível identificar que, para o mapeamento e a reconstrução tridimensional da vegetação arbórea, a técnica SfM e o método de envelope, respectivamente, confirmaram ser os mais exequíveis, levando em consideração o relativo baixo custo dos equipamentos e ferramentas disponíveis e a facilidade de execução por parte dos profissionais da área de construção e projeto de edificações.

Ressalta-se a importância de continuar a dedicar esforços ao desenvolvimento de sistemas cada vez mais precisos, robustos e acessíveis, capazes de medir as características geométricas de elementos arbóreos, que possam dar apoio ao desenvolvimento de pesquisas relacionadas ao estudo da iluminação natural, considerando a presença de árvores.

2.3 Métricas e métodos de análise da iluminação natural

2.3.1 MÉTRICAS PARA A AVALIAÇÃO DA ILUMINAÇÃO NATURAL

Diversas métricas de desempenho da luz do dia caracterizam diferentes aspectos da luz natural, como disponibilidade de luz do dia (WALSH, 1951; REINHART E WALKENHORST, 2001; NABIL E MARDALJEVIC, 2006; IES, 2012), ofuscamento e desconforto visual (GUTH, 1963; EINHORN, 1979; CHAUVEL, *et al.* 1982; WIENOLD e CHRISTOFFERSEN, 2005). Estas métricas são categorizadas em dois grupos: estático e dinâmico, com base no

período de análise e modelo de céu (NABIL e MARDALJEVIC, 2005).

Neste capítulo, são apresentadas as medidas utilizadas para a análise da iluminação natural no ambiente interno. As análises de iluminação natural podem ser realizadas por simulações computacionais ou por medições. No item 2.3.1.1, apresenta-se a principal medida utilizada para análise pontual (estática) que considera um céu uniforme: o Fator de Luz Diurna (*Daylight Factor*). No item 2.3.1.2, serão apresentadas as métricas dinâmicas da Iluminação Natural Modeladas com Base no Clima (*Climate Based Daylight Modelling – CBDM*). Esta forma de modelagem engloba as medidas de Autonomia da Luz Natural (*Daylight Autonomy*), Autonomia da Luz Natural Espacial (*Spacial Daylight Autonomy*), Iluminâncias Úteis (*Useful Daylight Illuminance*) e Exposição Anual à Luz Solar (*Annual Sunlight Exposure*) entre outras.

Serão apresentados, ainda, os parâmetros para a avaliação de ofuscamento mais abordados na literatura (Item 2.3.1.3): índice de ofuscamento em iluminação natural (DGI), índice de ofuscamento da CIE (CGI), probabilidade visual de conforto (VCP), índice de ofuscamento unificado (UGR) e probabilidade de ofuscamento em iluminação natural (DGP).

2.3.1.1 Fator de Luz do Dia

O Fator de Luz do Dia (*Daylight Factor – DF*) é uma métrica que expressa a quantidade percentual de luz do dia disponível dentro de um ambiente (em um plano de trabalho) em comparação com a quantidade de luz do dia desobstruída disponível fora sob condições de céu nublado (CIBSE, 1999).

Essa métrica é uma abordagem tradicional para avaliar a iluminância da luz do dia no interior de um edifício e mais utilizada devido à sua simplicidade (LI, LAU; LAM, 2004). O impacto da luz solar direta é ignorado neste método. A forma de cálculo para esta métrica é apresentada na equação 1, onde E_i é a iluminância horizontal interna e E_e é a iluminância horizontal externa sob céu nublado.

$$DF = \frac{E_i}{E_e} \cdot 100 \quad (1)$$

Segundo a CIBSE (1999), a escala DF é interpretada sob céu nublado CIE com a seguinte classificação: < 2% – não iluminando adequadamente; entre 2% e 5% – iluminado adequadamente e > 5% – bem iluminado (mas o brilho e a luz solar direta podem causar problemas).

Diversas pesquisas têm apontado as limitações do uso do Fator de Luz do Dia. Os

estudos já demonstraram que o DF é insensível ao período do ano, hora do dia, presença da radiação solar direta, orientação e localização do edifício. Os resultados indicam apenas condições de iluminação difusa (REINHART; MARDALJEVIC; ROGERS, 2006; MARDALJEVIC, HESCHONG, LEE, 2009).

Segundo Reinhart *et al.* (2006), o uso desta métrica pressupõe uma avaliação para o céu encoberto, levando a um conceito de “quanto maior o DF, melhor”. Esta situação levada ao extremo tem resultado em edifícios comerciais projetados com as fachadas com grandes panos de vidro, apresentando problemas com o conforto e a eficiência energética da edificação.

2.3.1.2 Modelagem da Iluminação Natural Baseada no Clima

As pesquisas mais recentes em iluminação natural vêm concentrando seus estudos em métricas baseadas no clima (*Climate Based Daylight Modelling* - CBDM) devido às limitações próprias das métricas estáticas. As métricas baseadas no clima permitem a predição quantitativa da luz (luminância e /ou iluminância) usando condições realísticas do Sol e do céu, acessados por meio dos arquivos climáticos das localidades.

Entre estas métricas, podemos citar aquelas baseadas em valores de iluminância: Autonomia da Luz Natural (*Daylight Autonomy* - DA), Iluminância Útil da Luz do Dia (*Useful Daylight Illuminance* - UDI), Autonomia Contínua da Luz Natural (*Continuous Daylight Autonomy* - DA_{con}), Autonomia Máxima da Luz Natural (*Maximum Daylight Autonomy* - DA_{máx}), Disponibilidade de luz do dia (*Daylight Availability* – DA_v), Mapa Temporal (*Temporal Map*), Autonomia Espacial da Luz do Dia (*Spatial Daylight Autonomy* - sDA), Exposição Anual à Luz do Sol (*Annual Sunlight Exposure* - ASE), Exposição Anual à Luz (*Annual Light Exposure* - ALE) (REINHART; MARDALJEVIC; ROGERS, 2006; REINHART, 2011b).

Essa métricas preveem quantidades absolutas ao longo de um ano, dependendo tanto da localização quanto da orientação do edifício, além da geometria do espaço e das propriedades ópticas do material (MARDALJEVIC *et al.*, 2009). Faixas aceitáveis para diferentes métricas de luz natural são definidas em guias de projeto e sistemas de classificação de edifícios verdes, como, por exemplo, o LEED e o BREEAM.

Nos itens que seguem, apresenta-se uma descrição das principais métricas dinâmicas baseadas em valores de iluminância.

2.3.1.2.1 Autonomia da Luz Natural

A Autonomia da Luz Natural (DA) descreve o “o percentual das horas de trabalho do ano em que um valor mínimo de iluminância consegue ser mantido apenas com luz natural” (REINHART *et al*, 2000). DA foi a primeira métrica dinâmica a ser elaborada. Por meio dela, é possível verificar o desempenho individual de pontos analisados no espaço, assim como a distribuição geral da luz no espaço (IESNA, 2011).

A Autonomia da Luz Natural é expressa pela equação 2, onde DA é a Autonomia da Luz Natural, t_i é o tempo ocupado em um ano, wf_i é o fator de ponderação que depende do limiar de iluminância, E_D é a iluminância da luz do dia medida em um determinado ponto, e E_L é o limiar de iluminância.

$$DA = \frac{\sum_i (wf_i \cdot t_i)}{\sum_i t_i} \in [0,1] \text{ com } wf_i = \begin{cases} 1 & \text{se } E_D \geq E_L \\ 0 & \text{se } E_D < E_L \end{cases} \quad (2)$$

Uma das críticas em relação a esta métrica é que ela não prevê um limite máximo de iluminância que o ambiente pode alcançar. Portanto, em algumas áreas do ambiente, nos quais ocorrem níveis muito elevados de iluminância, com probabilidade de ocorrer ofuscamento, não são detectadas como pontos problemáticos por meio da métrica de Autonomia da Luz Natural (PEREIRA, 2017).

Os valores referenciais de DA variam conforme alguns estudos. Voss *et al.* (2000) citam que deve ser atingido um valor mínimo de iluminância de 500 lux no escritório e 50 lux nos corredores. Já Reinhart (2001) amplia o conceito, admitindo como valor de referência 450 lux, tomando como base o normativo da Canadian Labour Codes (CLC, 1991) que prevê 500 lux, com uma margem de erro percentual de 10%. Reinhart, Mardaljevic e Rogers (2006) adotam iluminância mínima de 500 lux, citando que tal valor pode ser alterado conforme a necessidade e o uso do ambiente em estudo.

2.3.1.2.2 Autonomia Espacial da Luz Natural

A Autonomia Espacial da Luz do Dia (sDA) é uma métrica que descreve a suficiência anual dos níveis de luz do dia em ambientes internos. Segundo a IES (2012), é definida como a porcentagem de uma área de análise que atende a um nível mínimo de iluminação da luz do dia para uma fração especificada das horas de operação por ano.

O cálculo é realizado avaliando DA conforme definido por Reinhart e Walkenhorst

(2001), em cada ponto de uma grade espacial sobre a área de interesse, e então, apenas aqueles pontos, com DA não menor que um determinado valor de referência, são incluídos na soma, aumentando o valor de sDA. Seu cálculo é dado pela equação 3.

$$sDA_{x/y\%} = \frac{\sum_i (w_{fi} \cdot DA)}{\sum_i p_i} \in [0,1] \text{ com } w_{fi} = \begin{cases} 1 & \text{se } DA \geq DA_L \\ 0 & \text{se } DA < DA_L \end{cases} \quad (3)$$

Aqui, x é o nível de iluminância de referência, y é a fração de tempo, p_i são os pontos pertencentes à grade de cálculo e w_{fi} é um fator de ponderação dependente dos valores de DA.

A IES recomenda sDA 300/ 50% para análise de suficiência de luz natural, expressando a porcentagem de pontos da área analisada que atendem ou excedem o limite de iluminância horizontal de 300 lux por, pelo menos, 50% das horas ocupadas.

2.3.1.2.3 Autonomia Contínua da Luz Natural

A Autonomia Contínua da Luz Natural (DA_{con}), definida como a porcentagem de tempo ao longo do ano em que um determinado valor de iluminância é atingido pela luz do dia, foi proposta por Rogers (2006), sendo uma variante da métrica de Autonomia da Luz Natural (DA), atribuindo um crédito parcial linearmente a valores abaixo do limiar definido. Este conceito não foi tão amplamente utilizado, como aponta Acosta *et al.* (2019), embora seja uma métrica útil para mostrar o potencial de economia de energia, caso o sistema de iluminação artificial seja integrado à luz natural. A Autonomia Contínua da Luz Natural é dada pela equação 4.

$$DA_{con} = \frac{\sum_i (w_{fi} \cdot t_i)}{\sum_i t_i} \in [0,1] \text{ com } w_{fi} = \begin{cases} 1 & \text{se } E_D \geq E_L \\ E_D/E_L & \text{se } E_D < E_L \end{cases} \quad (4)$$

2.3.1.2.4 Autonomia Máxima da Luz Natural

Outro conceito derivado da Autonomia de Luz Natural é utilizado na verificação da probabilidade de ofuscamento, a Autonomia Máxima da Luz Natural ($DA_{máx}$), sugerida para considerar as ocorrências temporais de condições de superiluminação devido à luz solar direta. Essa métrica relata a porcentagem dos intervalos de tempo ocupados anualmente quando o nível de iluminância excede dez vezes um limite predefinido (REINHART; MARDALJEVIC; ROGERS, 2006). Se $DA_{máx}$ for superior a 5%, existe uma grande probabilidade de que isso leve a uma situação com uma mancha de luz solar direta e, portanto, ofuscamento (BELLIA *et al.*, 2020).

2.3.1.2.5 Autonomia de Luz Natural Mínima

O conceito mais recente derivado da Autonomia da Luz é a Autonomia de Luz Natural Mínima ($DA_{\min}$) (ACOSTA *et al.*, 2019). O conceito é definido pela equação 5, onde t_i é o tempo ocupado em um ano; wf_i é o fator de ponderação, que depende do limiar de iluminância; E_{DO} é a iluminância da luz do dia medida em um determinado ponto sob condições de céu nublado, e E_L é o limiar de iluminância.

$$DA_{\min} = \frac{\sum_i (wf_i \cdot t_i)}{\sum_i t_i} \in [0,1] \text{ com } wf_i = \begin{cases} 1 & \text{se } E_{DO} \geq E_L \\ 0 & \text{se } E_{DO} < E_L \end{cases} \quad (5)$$

Pode se definir Autonomia de Luz Natural mínima como o percentual de tempo ocupado pelo ambiente onde o valor de referência de iluminância é atingido sob condições de céu encoberto, representando o pior cenário de disponibilidade de luz natural para o ambiente (ACOSTA *et al.*, 2019).

2.3.1.2.6 Iluminância Útil da Luz do Dia

A Iluminância Útil da Luz do Dia (UDI) é definida como a fração do tempo em que a iluminância da luz do dia horizontal interna em um determinado ponto se encaixa em um determinado intervalo. São propostos valores-limite inferior e superior de iluminância para dividir o período analisado em três categorias: a categoria superior representa a porcentagem do tempo em que um excesso de luz do dia pode causar desconforto visual, a categoria inferior representa a porcentagem do tempo em que há pouca luz do dia, e a caixa intermediária representa a porcentagem do tempo com nível de iluminância apropriado (CARLUCCI *et al.*, 2015). O cálculo da Iluminância Útil pode ser definido pela equação 6.

$$UDI = \frac{\sum_i (wf_i \cdot t_i)}{\sum_i t_i} \in [0,1] \quad (6)$$

$$UDI_{\text{excessivo}} \text{ com } wf_i = \begin{cases} 1 & \text{se } E_{\text{luz do dia}} > E_{\text{limite superior}} \\ 0 & \text{se } E_{\text{luz do dia}} \leq E_{\text{limite superior}} \end{cases}$$

$$UDI_{\text{útil}} \text{ com } wf_i = \begin{cases} 1 & \text{se } E_{\text{limite inferior}} \leq E_{\text{luz do dia}} \leq E_{\text{limite superior}} \\ 0 & \text{se } E_{\text{luz do dia}} < E_{\text{limite inferior}} \text{ ou } E_{\text{luz do dia}} > E_{\text{limite superior}} \end{cases}$$

$$UDI_{\text{escasso}} \text{ com } wf_i = \begin{cases} 1 & \text{se } E_{\text{luz do dia}} < E_{\text{limite inferior}} \\ 0 & \text{se } E_{\text{luz do dia}} \geq E_{\text{limite inferior}} \end{cases}$$

De acordo com Nabil e Mardaljevic (2006), o UDI informa não apenas sobre os níveis

úteis de iluminância da luz do dia, mas também sobre a frequência de ocorrência de níveis excessivos de luz do dia que podem causar desconforto aos ocupantes (ou seja, ofuscamento) e ganhos solares indesejados. A não existência de um acordo total sobre os valores-limite de iluminância pode ser entendida como uma limitação dessa métrica. A IES recomenda UDI com limite inferior igual a 100 lux e limite superior igual a 3000 lux.

Alguns autores defendem limites diferentes de UDI, como, por exemplo:

- Nabil e Mardaljevic (2006) – limite inferior igual a 100 lux e limite superior igual a 2000 lux;
- Mardaljevic e Hescong (2009) – limite inferior igual a 100 lux e limite superior igual a 2500 lux;
- Olbina e Beliveau (2009) – limite inferior igual a 500 lux e limite superior igual a 2000 lux;
- David e Donn (2011) – limite inferior igual a 300 lux e limite superior igual a 8000 lux.

2.3.1.2.7 Exposição Anual à Luz do Sol

A Exposição Anual à Luz do Sol (ASE) é a proporção do espaço analisado que recebe mais do que uma certa quantidade de luz solar direta em um número específico de horas do ano. A recomendação da IES (2012) é ASE 1000, 250h, que é a porcentagem de espaço em que, em mais de 250 horas do ano, a exposição direta do sol é superior a 1000 lux. Semelhante ao sDA, o ASE pode ser representado matematicamente com a equação 7, onde AT_i é a contagem de ocorrência que excede o limite de iluminância ASE no ponto i , e t_i representa o limite anual absoluto de horas.

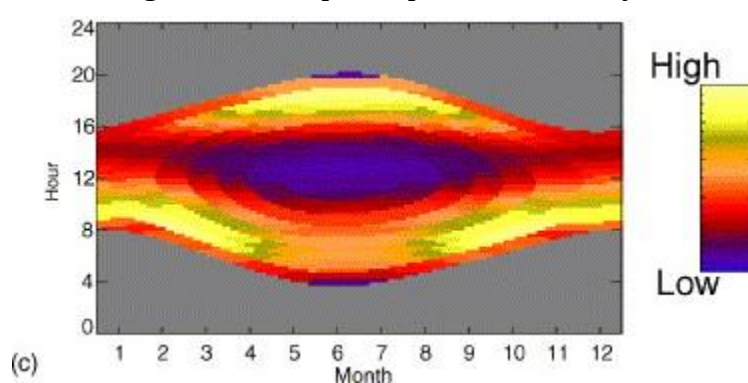
$$ASE = \frac{\sum_{i=1}^N AT_{(i)}}{N} \quad \text{com} \quad AT_{(i)} = \begin{cases} 1 & \text{se } at_i \geq T_i \\ 0 & \text{se } at_i < T_i \end{cases} \quad (7)$$

A métrica é utilizada, principalmente, para a avaliação da probabilidade de ofuscamento (KO *et al.*, 2017) e reflete alguns conceitos da $DA_{m\acute{a}x}$. Sua definição prevê faixas de aceitação da métrica que, segundo a LM-83 (IES, 2012), onde o valor de ASE for maior que 10%, julga-se que houve conforto visual insatisfatório e que os ocupantes podem relatar situações de desconforto por excesso de luz e ofuscamento. Espaços com menos de 7% são considerados neutros (nominalmente aceitos), enquanto espaços com menos de 3% são claramente aceitáveis.

2.3.1.2.8 Mapa Temporal da Iluminação

Esta forma de representação foi proposta por Mardaljevic (2004). O gráfico se apresenta em cores falsas e representa o desempenho ao longo do ano das condições da iluminação, para um determinado ponto no interior do ambiente simulado. Este gráfico deve ser usado junto com outras métricas, como o DA e UDI, para uma avaliação pontual do ambiente. O mapa temporal apresenta, no eixo x (abscissa), os dias do ano e, no eixo y (ordenada), as horas do dia. A Figura 12 apresenta um mapa temporal da iluminação extraído de Mardaljevic (2004).

Figura 12 – Mapa temporal de iluminação



Fonte: extraído de Mardaljevic (2004)

As métricas DA e UDI apontam o percentual de horas de trabalho em que a iluminância atinge um valor requerido para o ambiente (valor-alvo). Porém, estas métricas não apontam o período do dia e época do ano em que o valor requerido para o ambiente é alcançado ou não (ANDERSEN *et al.*, 2008; KLEINDIENST, S; BODART, M.; ANDERSEN, 2008).

Mardaljevic (2004) ressalta que a adoção de uma abordagem baseada em imagem confere vantagens significativas sobre os métodos de avaliação convencionais. Além de fornecer dados de desempenho precisos e quantitativos, as imagens podem ser facilmente compreendidas com o mínimo de explicação.

2.3.1.3 Parâmetros de avaliação do ofuscamento

O fenômeno do ofuscamento desconfortável pode ser definido segundo Hirning *et al.* (2014), como uma sensação de incômodo ou de dor causada por distribuições inadequadas de luminosidade no campo de visão, significativamente superiores à luminância a que o sistema visual está adaptado.

Segundo Suk, Schiler e Kensek (2017), o ofuscamento pode ser descrito de três maneiras

principais: de acordo com o processo que criou o ofuscamento, de acordo com o grau de intensidade do ofuscamento percebido por um indivíduo e de acordo com os resultados do ofuscamento. Já existem muitos índices de ofuscamento, incluindo DGP (*Daylight Glare Probability*), DGI (*Daylight Glare Index*), UGR (*Unified Glare Rating*), VCP (*Visual Comfort Probability*) e CGI (*CIE Glare Index*) focam na avaliação do grau percebido de intensidade do ofuscamento.

DGP e DGI foram desenvolvidos especificamente para o ofuscamento relacionado à luz natural, que precisa ser tratado de forma diferente do problema de desconforto visual das fontes de luz elétrica. As equações dos índices de ofuscamento parecem complexas, mas usam as mesmas variáveis com diferentes fatores de ponderação. As equações 8 a 12 definem os índices de ofuscamento mencionados.

$$DGP = 5,87 \cdot 10^{-5} \cdot E_v + 0,092 \cdot \log \left(1 + \sum_i \frac{L_{s,i}^2 \cdot \omega_{s,i}}{E_v^2 \cdot P_i^2} \right) + 0,16 \quad (8)$$

$$DGI = 10 \cdot \log \left(0,478 \sum_i \frac{L_{s,i}^{1,6} \cdot \omega_{s,i}^{0,8}}{L_b + 0,07 \cdot \omega_{s,i}^{0,5} \cdot L_{s,i}} \right) \quad (9)$$

$$UGR = 8 \cdot \log \left(\frac{0,25}{L_b} \sum_i \frac{L_{s,i}^2 \cdot \omega_{s,i}}{P_i^2} \right) \quad (10)$$

$$VCP = \left[224,2 - 46,8 \cdot \log \left(\sum_i \left(\frac{0,5 \cdot L_{s,i} (20,4 \cdot \omega_{s,i} + 1,52 \cdot \omega_{s,i}^{0,2} - 0,075)}{P_i \cdot L_a^{0,44}} \right)^{-0,0914} \right) \right] + 50 \quad (11)$$

$$GGI = 8 \cdot \log \left(2 \cdot \frac{1 + (E_d/500)}{E_v} \sum_i \frac{L_{s,i}^2 \cdot \omega_{s,i}}{P_i^2} \right) \quad (12)$$

E_v é a iluminância vertical ao nível dos olhos (lux); E_d é a iluminância vertical direta (lux); L_s é a luminância da fonte (cd/m²); L_b é a luminância média de fundo (cd/m²); L_a é a luminância média de todo o campo de visão; ω_s é o ângulo sólido da fonte, e P_i é o índice de posição Guth.

O Quadro 4 mostra diferentes faixas de pontuação dos cinco índices de ofuscamento para categorizar diferentes níveis. Pontuações mais baixas representam níveis mais baixos de ofuscamento de desconforto, exceto para VCP, onde uma pontuação mais alta representa melhor conforto visual. Estes limites foram adotados nesta pesquisa como parâmetro para as análises de ofuscamento.

Quadro 4 – Faixas de valores da métrica de conforto visual

Classificação de desconforto	Valores do intervalo de brilho				
	DGP	DGI	UGR	VCP	CGI
Imperceptível	<0.30	<18	<13	80 - 100	<13
Perceptível	0.30 – 0.35	18 - 24	13 - 22	60 - 80	13 - 22
Perturbador	0.35 – 0.45	24 - 31	22 - 28	40 - 60	22 - 28
Intolerável	>0.45	>28	>28	<40	>28

Fonte: Jakubiec e Reinhart (2012).

Jakubiec e Reinhart (2012) afirmam que, entre os cinco índices apresentados acima, o DGP mostra os resultados mais robustos para a maioria das situações de luz do dia. O VCP não se destina a ser usado para cálculos de ofuscamento à luz do dia, e o CGI tende a superestimar os níveis de ofuscamento. DGI e UGR podem ser usados para a avaliação do ofuscamento da luz do dia, mas funcionam apenas quando a luz solar direta não entra.

2.3.1.3.1 Probabilidade de ofuscamento (DGP)

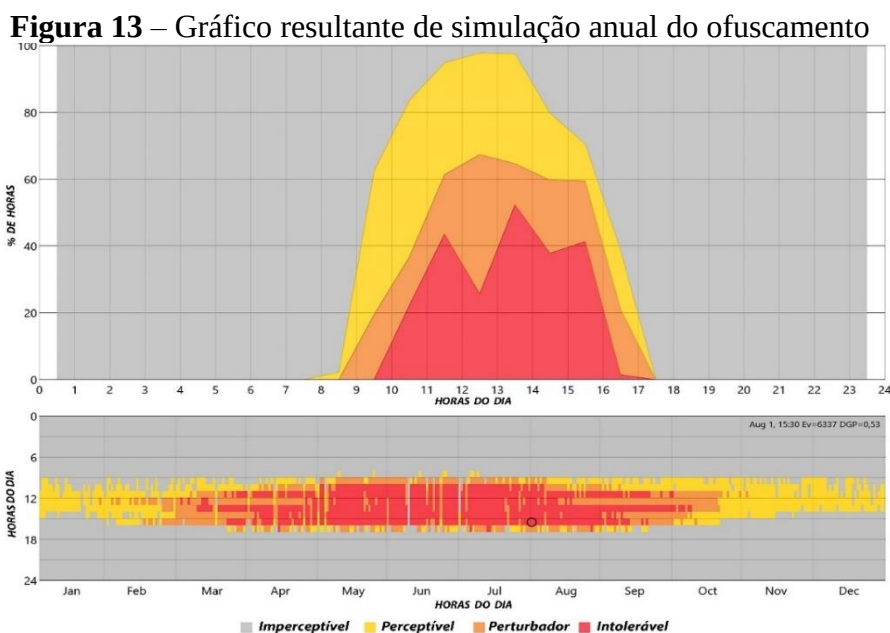
A probabilidade de ofuscamento em iluminação natural (DGP) é referente a um percentual de pessoas que se sentem desconfortáveis em relação à luz natural de um determinado local (WIENOLD e CHRISTOFFERSEN, 2006). Esta métrica proposta por Wienold e Christoffersen (2006) foi derivada de testes de laboratório em espaços com iluminação natural, realizados com 72 pessoas, na Dinamarca e Alemanha. Segundo os autores, a métrica DGP apresentou uma correlação mais satisfatória, de acordo com a experiência que os usuários relatavam durante o experimento.

DGP é um índice empírico, em função da iluminância vertical do olho, luminância da fonte, ângulo sólido da fonte e índice de posição. São considerados a luz solar direta e as reflexões especulares no cálculo do DGP (WIENOLD e CHRISTOFFERSEN, 2006). A faixa de classificação atual é imperceptível para $DGP \leq 34\%$; perceptível para $34\% < DGP \leq 38\%$; perturbador para $38\% < DGP \leq 45\%$; intolerável para $DGP > 45\%$ (WIENOLD *et al.*, 2019).

Wienold (2009) afirma que, em 95% do horário de ocupação, os valores do DGP devem ser menores ou iguais à classificação do “imperceptível”. Além disso, nos 5% restantes do horário de ocupação, o DGP médio deve ser menor ou igual ao valor médio de “perceptível”.

Por meio de simulações, é possível verificar o potencial de risco de ofuscamento ao longo do ano para uma determinada vista em um ambiente. A avaliação é feita em função do índice DGP. Este índice analisa as luminâncias em cada ponto do campo visual para as 8.760

horas do ano, possibilitando a avaliação da probabilidade de ocorrer ofuscamento. A Figura 13 apresenta o gráfico resultante de uma simulação. No gráfico a, apresenta-se o comportamento do ofuscamento ao longo de um determinado dia. No gráfico b, o ofuscamento pode ser visualizado ao longo de um ano. A legenda indica a escala de análise do ofuscamento que vai da pior situação (ofuscamento intolerável – $DGP \geq 0,45$), até a melhor situação (ofuscamento imperceptível – $0,35 > DGP$).



Fonte: dados da pesquisa, 2023, a partir de simulação realizada no ClimateStudio.

2.3.2 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA ILUMINAÇÃO NATURAL

Segundo Reinhart (2005), para uma análise rigorosa da iluminação natural, deve-se seguir os seguintes passos: 1 – estimar a disponibilidade de luz na edificação por meio de simulações ou outros métodos; 2 – converter os resultados em medidas de desempenho da luz natural; 3 – interpretar o resultado do desempenho para tomar decisões de projeto.

As ferramentas utilizadas nas etapas de cálculo e na avaliação da iluminação natural podem ser divididas em três categorias principais: modelo físico em escala reduzida, cálculos manuais e simulações computacionais.

2.3.2.1 Cálculos manuais

Há diversas ferramentas manuais para o cálculo da iluminação natural, incluindo, nesta categoria, os métodos matemáticos e métodos gráficos (BAKER; STEEMERS, 1998). “Os

Métodos matemáticos são procedimentos de cálculo desenvolvidos através de equações baseadas nas hipóteses físicas, parâmetros geométricos e procedimentos analíticos” (LIMA, CHRISTAKOU, 2007, p.51) Os gráficos são muito utilizados nas fases iniciais de projeto, podendo, entre eles, ser citados os nomogramas, os transferidores, o diagrama de Waldram, a carta solar, além de outros.

Os métodos matemáticos ou analíticos surgiram a partir da consideração teórica do comportamento do fluxo luminoso. Estes métodos geram dados de iluminação com equações analíticas ponto por ponto, no interior de um espaço, partindo de determinadas características do céu. Alguns métodos matemáticos são: o Método dos Lumens, Método do Fluxo Dividido e Fator de Luz do Dia (FLD).

Os métodos gráficos trabalham com representações simplificadas (monogramas, diagramas) que permitem o cálculo de níveis de iluminação natural para um ponto no ambiente interior. Geralmente, são de fácil aplicação e permitem análises rápidas, entretanto, apresentam algumas limitações, como a simplicidade de sua aplicação e a metodologia de avaliação ponto a ponto para o desenvolvimento de estudos paramétricos. O embasamento teórico de alguns deles é a divisão do fluxo luminoso, em seus três componentes: Componente Celeste (CC); Componente Refletida Interna (CRI) e Componente Refletida Externa (CRE), como, por exemplo, transferidores de iluminação natural e Diagramas de Contribuição Relativa da Luz (DCRL).

A norma NBR15215-3 (ABNT 2005) apresenta um método gráfico de cálculo de iluminação, aplicando os Diagramas de Contribuição Relativa de Luz (DCRL). Este método representam a abóboda celeste em projeção estereográfica, subdivididas em 244 zonas. Estes diagramas, elaborados para altitudes solares de 15°, 30°, 45°, 60°, 75° e 90°, representam a distribuição de luminâncias do céu. O método permite o cálculo de iluminâncias internas para as condições de céu claro e céu encoberto. Cada zona apresenta numericamente a sua contribuição relativa para a iluminância no plano horizontal desobstruído, em função da altitude solar (SOUZA; PEREIRA, 1997).

2.3.2.2 Modelo físico em escala reduzida

O uso de modelos físicos reduzidos é um dos métodos mais antigos de avaliação da iluminação natural. Com o desenvolvimento de ferramentas de simulação de iluminação na década de 1990, o interesse dos pesquisadores em maquetes vem diminuindo. Mas essa ferramenta ainda oferece muitas vantagens. De fato, modelar edifícios e vegetação no entorno

é um desafio: as árvores são particularmente difíceis de modelar, pois filtram a luz de maneira complexa. Além disso, não é simples medir as propriedades fotométricas de todos os materiais encontrados no ambiente da construção, particularmente em nível urbano. Como o impacto dos edifícios e estruturas circundantes nas quantidades de iluminação pode ser considerável e como a modelagem da vegetação pode ser demorada, muitas vezes, é mais viável medir as quantidades de luz no local em um modelo em escala (BODART; CAUWERTS, 2017).

O principal objetivo da modelagem em escala é analisar o comportamento da luz do dia dentro de uma réplica em pequena escala de um edifício pretendido sob céu real ou condições de céu artificial e obter informações sobre o provável comportamento da luz do dia. Embora alguns estudos tenham mostrado a tendência do modelo em escala reduzida de superestimar o nível de iluminância da luz natural (THANACHAREONKIT *et al.*, 2005), Cheng *et al.* (2007) afirmam que modelos em escala adequadamente projetados geralmente apresentam uma abordagem eficaz para estudar o comportamento da luz do dia e são frequentemente empregados na otimização de projetos paramétricos da luz do dia.

Thanachareonkit *et al.* (2005) investigaram as fontes de discrepâncias entre os valores de iluminância medidos em uma sala e em seu modelo em escala. A precisão das dimensões geométricas da maquete, as propriedades fotométricas, bem como as de suas refletâncias das superfícies internas, foram identificadas como fatores-chave em relação às discrepâncias entre a maquete e o ambiente real. A Figura 14 apresenta os fatores de erro mais comuns dos modelos físicos em escala.

Figura 14 – Fatores de erros mais comuns em modelos físicos reduzidos

Autores	Fatores Físicos	Divergência Relativa da Maquete Vs Edificação
Schiler (1987)	Detalhes da maquete. Refletâncias das superfícies. Vazamentos de iluminação.	
Love - Navvab (1991)	Calibração dos luxímetros Refletâncias das superfícies Reprodução da maquete Detalhes das aberturas Tamanho dos sensores Faixas de medição dos sensores Posicionamento dos sensores	Entre + 30% a + 50%
Cannon - Brookes (1997)	Exatidão dimensional Propriedades fotométricas Refletâncias das superfícies Transmitâncias das janelas Manutenção e limpeza	Entre + 10% a + 25%
Mardaljavic (2002)	Exposição a céus naturais Tamanho dos sensores Posicionamento dos sensores Calibração dos sensores	+ de 50 sob Céus Encobertos
	Faixas de iluminação elevadas Sensibilidade a deslocamentos Precisão e tempo de resposta dos equipamentos	Entre + 100% e + 250% Sob Céus claros

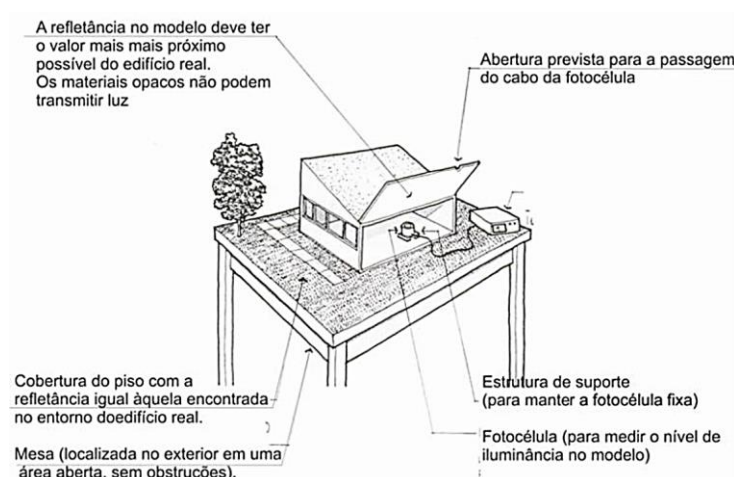
Fonte: Thanachareonkit *et al.* (2005) *apud* Castaño (2007).

Baker e Steemers (2002) descrevem as principais regras que devem ser observadas na construção do modelo reduzido:

- O material utilizado nas paredes deve ser totalmente opaco, e as junções das superfícies externas devem ser vedadas, de forma que não ocorra vazamento de luz.
- Quando apropriado, algumas partes do modelo devem ser móveis, pois isso permite modificações internas e externas de alguns elementos do modelo, tornando possível a comparação entre alternativas de projeto.
- O coeficiente de reflexão interno e externo deve ser o mais próximo possível das superfícies do edifício real.
- A geometria do edifício deve ser precisa. Deve-se tomar cuidado especial na modelagem das aberturas, caixilhos e vidros.
- O mobiliário deve ser incluído, principalmente se estiver acima do plano de trabalho.
- As obstruções externas devem ser consideradas no modelo. Elas podem ser consideradas como superfícies planas.
- Caso os vidros não sejam colocados no modelo, o fator de manutenção deve ser considerado posteriormente.
- As dimensões e o peso do modelo devem ser considerados para a facilidade de transporte e de seu uso.
- No caso de ser utilizado o céu artificial, a dimensão do modelo deve ser pequena em relação à distância da fonte de luz.
- Devem ser previstas aberturas para a entrada de sensores de iluminação e câmeras.

Na Figura 15, podem ser observados alguns requisitos importantes que devem ser considerados na construção de um modelo em escala reduzida.

Figura 15 – Requisitos para construção do modelo reduzido



Fonte: Egan (1983) *apud* Pereira (2006, p. 96).

Segundo Pereira (2006), a escala ideal para a execução do modelo físico reduzido depende do objetivo final a ser atingido. Portanto, é importante determinar as variáveis que se deseja investigar.

O objetivo pode variar desde o estudo volumétrico do edifício e seu entorno para a análise do sombreamento, até o interesse em questões quantitativas e qualitativas da luz no interior do modelo. Entre estes dois extremos existem diversas escalas que podem ser executadas. (PEREIRA, 2006).

As escalas mais comuns de construção seguem a série: 1:10, 1:20, 1:50, 1:100. A tabela 5 extraída de Ruck *et al.* (2000) apresenta a relação entre as escalas adotadas e o propósito do projeto de iluminação natural.

Quadro 5 – Escolha da escala em função do propósito do projeto de iluminação natural

ESCALA	OBJETIVOS
1:200 – 1:500	• Para projeto preliminar e desenvolvimento do conceito • Para fornecer o aspecto volumétrico do projeto • Para estudar a sombra criada pelo futuro edifício ou pelos edifícios do entorno
1:200 – 1:50	• Para estudar a penetração da luz direta do Sol nos edifícios • Para estudar a luz difusa em um grande espaço
1:100 – 1:10	• Para considerar o refinamento de detalhes em componentes do espaço • Para obter vistas do interior bastante detalhada (uso de vídeo ou fotos) • Para o estudo preciso da luz e a penetração da luz direta
1:10 – 1:1	• Para integrar componentes industriais críticos • Para considerar dispositivos usados para o projeto de iluminação natural que não podem ser reduzidos em escala • Para fazer a avaliação de um sistema avançado de iluminação natural através do monitoramento e avaliação do usuário

Fonte: extraído de Ruck *et al.* (2000)

Para Baker (1993), a obtenção de informação qualitativa do funcionamento da iluminação com uma maquete permite definir estratégias de conforto visual, além de obter uma percepção clara das características espaciais do ambiente interno.

A fotometria em modelos em escala é uma técnica estabelecida e usada no projeto de iluminação natural há muito tempo. Dados quantitativos medidos em maquetes permitem avaliar a eficiência da iluminação natural, para atender a exigências visuais e fazer projeções sobre as necessidades de reforço com iluminação artificial (BAKER, 1993).

O estudo qualitativo parte da definição espacial de um projeto e da construção em escala reduzida de um modelo, que reproduza com o maior grau de precisão possível o espaço interior. A maquete em escala reproduz, de maneira simultânea, todas as contribuições e características da iluminação natural no interior de um espaço arquitetônico, não só pela admissão da luz direta através das aberturas do edifício, mas também pela reflexão nas superfícies internas e externas. Nesse tipo de análise, é possível avaliar as características da iluminação no interior dos

modelos, identificando zonas de contraste, zonas com excesso ou deficiência de luz e desempenho das aberturas, além de simular também fechamentos translúcidos e demais componentes do sistema de iluminação (CASTAÑO, 2007).

Para avaliações quantitativas de iluminação, as condições de variabilidade do céu real podem afetar consideravelmente, em até 15%, o levantamento de dados de iluminação no interior dos modelos, mesmo em dias aparentemente idênticos (MOORE, 1985).

Alguns estudos experimentais de iluminação natural utilizando modelos em escala reduzida têm demonstrado que a utilização destes modelos é eficaz para compreender o comportamento da luz solar de maneira qualitativa e quantitativa de um ambiente estudado.

O estudo de Bodart e Cauwerts (2017) apresenta uma pesquisa sobre a possibilidade de usar uma maquete de uma sala para avaliar as luminâncias no campo visual do usuário e, conseqüentemente, seu risco de ofuscamento. Os autores concluíram que, para a situação testada, o DGP pode ser avaliado usando um modelo em escala, sob a condição de respeitar com muita precisão a geometria e os dados fotométricos das paredes da sala estudada. Também é muito importante posicionar a maquete de forma a obter uma vista exterior o mais semelhante possível à obtida na sala estudada.

No Brasil, Pereira (2006) analisou um método para avaliação da iluminação natural, utilizando os modelos físicos reduzidos como ferramenta, com o intuito de avaliar os aspectos quantitativos e qualitativos da luz. Foi realizado um diagnóstico deste método, mostrando suas qualidades e limitações. As conclusões da pesquisa demonstraram que, para alcançar resultados confiáveis, é necessário construir os modelos com precisão, sendo recomendável medir a iluminância dos mesmos sob diversas condições de céu, para que, desta forma, seja possível avaliar o desempenho médio da iluminação natural por um longo período.

Outro estudo brasileiro, realizado por Cordeiro (2018), avaliou o desempenho lumínico em salas hipotéticas de escritórios, por meio da utilização de diferentes geometrias de cobogós. A metodologia consistiu na análise do nível de iluminância e da uniformidade da luz nos ambientes estudados. Para tal, foram utilizados dois métodos: o computacional e o experimental, nos quais foram avaliados modelos de escala reduzida. O estudo concluiu que o método experimental revelou-se uma ferramenta útil na visualização da distribuição espacial da luz no ambiente estudado.

2.3.2.3 Simulações computacionais

As avaliações com medidas dinâmicas só são possíveis por meio da simulação

computacional. A simulação do desempenho de um edifício pode ser definida como um modelo matemático computacional de aspectos do desempenho da edificação com base em princípios físicos fundamentais e modelos de engenharia (HENSEN, 2006 *apud* FONSECA, 2015). No caso da iluminação natural, os modelos devem prever a quantidade de luz disponível em um ambiente.

Nas últimas décadas, as ferramentas computacionais para avaliação da iluminação natural vêm ganhando cada vez mais espaço, devido ao seu grande potencial de análise dos aspectos quantitativos e qualitativos da luz, integradas aos aspectos energéticos da edificação. Por meio destas ferramentas, é possível realizar avaliações de geometrias complexas e permitir a flexibilidade de se fazerem modificações paramétricas do modelo, proporcionando a avaliação de diversas propostas com maior rapidez (PEREIRA, 2017).

Ainda assim, enfrentam-se vários desafios relacionados aos cálculos de luz natural por meio de simulações computacionais, e Ayoub (2020) cita alguns destes desafios:

- Simulações de luz natural exigem um conjunto complexo de entradas, como dados meteorológicos, modelo de céu, geometria do espaço, localização, contexto circundante, configurações de abertura e propriedades dos materiais.
- Juntamente com fontes potenciais de erros, as simulações de luz do dia herdam muitas dificuldades que decorrem de incertezas relacionadas a geometrias complexas e à definição de materiais que não podem corresponder com precisão à realidade.
- Além disso, a saída de simulações de luz do dia normalmente produz uma grande quantidade de dados que precisam ser reduzidos em métricas simplificadas. A maioria das métricas de luz do dia, como Autonomia da Luz do Dia e Iluminância Útil da Luz do Dia, relatam as ocorrências temporais de conforto visual, mas sem considerações espaciais. Embora o método aprovado de medição de luz natural (IES, 2012) tenha expandido tais métricas com consideração espacial e introduzido a Autonomia Espacial da Luz do Dia (sDA300/50%) e a Exposição Anual à Luz Solar (ASE1000/250h), eles não capturam as ocorrências espaciais e temporais juntas.
- Mesmo com os computadores de hoje, as simulações de luz do dia são demoradas e computacionalmente caras. Essas limitações levaram muitos pesquisadores a desenvolverem abordagens mais eficientes, como CBDM de 3 e 5 fases (LEE *et al.*, 2018; SAXENA *et al.*, 2010), juntamente com a previsão em tempo real do desempenho do edifício (JONES e REINHART, 2015, MCNEIL e LEE, 2012).
- Mais uma vez, os arquitetos que carecem de habilidades de simulação ficam

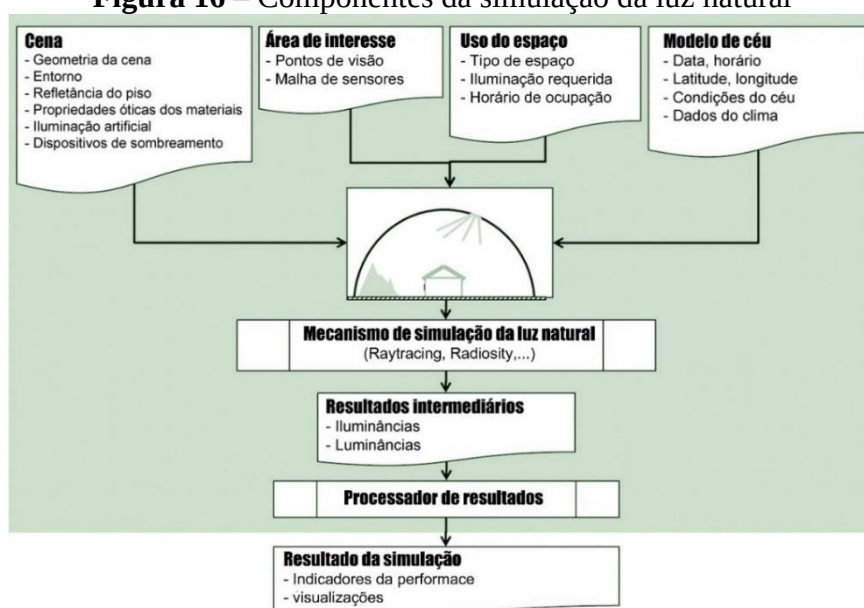
desinteressados em incluir o que consideram métodos complexos em suas práticas. Mesmo para profissionais experientes, as simulações anuais podem ser tediosas para adquirir várias alternativas de projeto em prazos aceitáveis.

- Isso estrangula o processo de projeto de natureza iterativa e dificulta aproximações preliminares rápidas durante os estágios iniciais do projeto, quando muitas decisões importantes são tomadas.

Os programas de simulação da iluminação natural fazem uso de algoritmos de cálculo para prever iluminâncias e luminâncias de um dado ponto num dado instante com base em um modelo geométrico do edifício e nas condições do céu nesse dado instante (REINHART, 2010). Os algoritmos de cálculo interpretam os dados do projeto, relacionando-os com os dados climáticos que caracterizam as condições de céu, seja para um instante no tempo ou ao longo dos dias, meses e ano.

De acordo com Reinhart (2005), para a simulação da luz natural, é necessário definir aspectos relacionados à cena, como geometria, propriedades óticas dos materiais, dispositivos de sombreamento; definir os pontos de medição (sensores); definir o tipo de uso do espaço; quanto de iluminação este espaço requer e, finalmente, definir os aspectos do clima e condições de céu. Então, são gerados resultados intermediários de luminâncias e iluminâncias e resultados da simulação em forma de indicadores numéricos da performance e/ou visualização gráfica. A Figura 16 apresenta um esquema das Informações requeridas pela ferramenta de simulação computacional sobre o edifício e a condição de céu, para cálculo da distribuição da luminância e iluminância.

Figura 16 – Componentes da simulação da luz natural



Fonte: adaptado de Reinhart (2012).

Atualmente, existem várias ferramentas de simulação computacional para análise da iluminação natural. Entre essas ferramentas, o Radiance é considerado um dos mais eficientes. Os resultados da simulação com ele foram fisicamente validados para uma variedade de geometrias de construção e dispositivos de sombreamento. O Radiance tem sido estudado sistematicamente na última década (MARDALJEVIC, 2000; REINHART e OLIVER, 2001; REINHART e ANDERSEN, 2006; MCNEIL *et al.*, 2013; MCNEIL e LEE, 2013; LEE *et al.*, 2018). Alguns desses estudos têm mostrado que essa ferramenta pode ser combinada com uma abordagem de Coeficiente de Luz do Dia para modelar, de forma confiável, os níveis variáveis de luz do dia em um edifício ao longo de um ano.

Apesar de ser um programa bastante respeitado pela comunidade científica, devido às numerosas possibilidades de aplicação e precisão dos dados, deve-se considerar que o seu uso exige um grande conhecimento, sendo necessário investir muitas horas para a sua capacitação (TEIXEIRA, 2004).

O programa em pauta não possui uma interface amigável aos usuários. Uma alternativa para contornar este fato é a possibilidade de utilizar outros programas que possuem este requisito e que utilizam o Radiance como motor de cálculo. Podem-se citar alguns programas que permitem a exportação do modelo eletrônico para utilizar o algoritmo de cálculo do *Radiance*, entre os quais: o Ecotect, o Adeline, o Delight, o Daysim, o DIVA e mais recentemente o ClimateStudio.

2.3.3 MAPEAMENTO DA LUMINÂNCIA ATRAVÉS DE IMAGENS HDR

A imagem High Dynamic Range (HDR) é tradicionalmente usada para criar imagens fotorrealistas combinando várias imagens Low Dynamic Range (LDR). Considerando pesquisas na área de iluminação, os mapas de luminância são frequentemente usados para avaliar cenas de iluminação do ponto de vista do ocupante do ambiente. A fotografia HDR pode ser usada para gerar esses mapas de luminância, como é observado em diversas pesquisas que objetivam capturar dados de luminância de alta resolução para análise da percepção visual e conforto em espaços arquitetônicos (FAN, *et al.* 2009; VAN DEN WYMELENBERG, *et al.* 2010; VAN DEN WYMELENBERG e INANICI 2014; KONIS 2014; HIRNING 2014; JAKUBIEC, *et al.* 2016; KONG e JAKUBIEC, 2021; KONG *et al.*, 2022).

A fotografia HDR envolve um processo pelo qual várias exposições fotográficas são tiradas usando uma câmera digital comum e calibradas com uma leitura de sensor de luminância

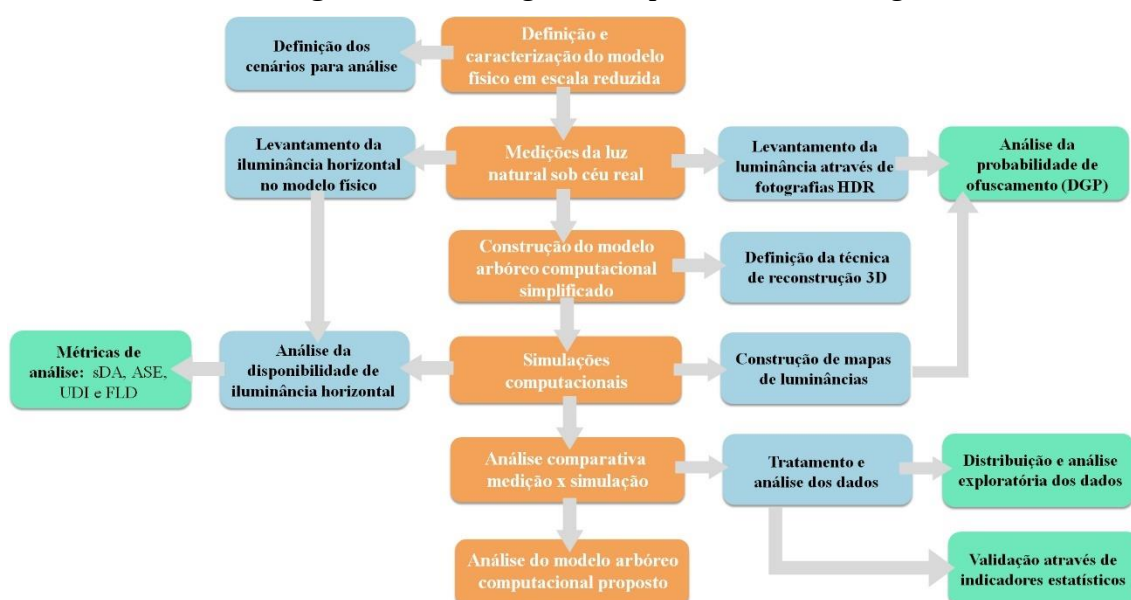
e *software* de computador especializado. O resultado desse processo é uma medição *point-in-time*, na qual um valor de luminância está associado a cada pixel de uma fotografia (JAKUBIEC *et al.*, 2016). Com a calibração da imagem HDR, um mapa de luminância é gerado, podendo ser usado para obter informações, como a luminância média, a iluminância vertical ou as fontes de brilho no campo de visão.

Segundo a pesquisa de Inanici (2006), para cenas em que o valor máximo de luminância é inferior a 30.000 cd/m^2 , a maioria dos valores de luminância do mapa de luminância podem ser esperados dentro de uma faixa de erro de 10%, tornando a fotografia HDR relevante como ferramenta de medição da luz.

3 MÉTODO DE PESQUISA

O método tem como base medições com modelos físico em escala reduzida e simulações computacionais, compreendendo cinco estágios principais: definição e caracterização do modelo em escala reduzida da edificação e da árvore; medições da iluminância sob céu real; construção do modelo arbóreo computacional simplificado; simulações computacionais e, por último, análises comparativas entre medições e simulações. A Figura 17 apresenta um fluxograma que ilustra as diversas etapas para o desenvolvimento desta pesquisa, bem como a ordem pela qual estas foram realizadas.

Figura 17 – Fluxograma do processo metodológico



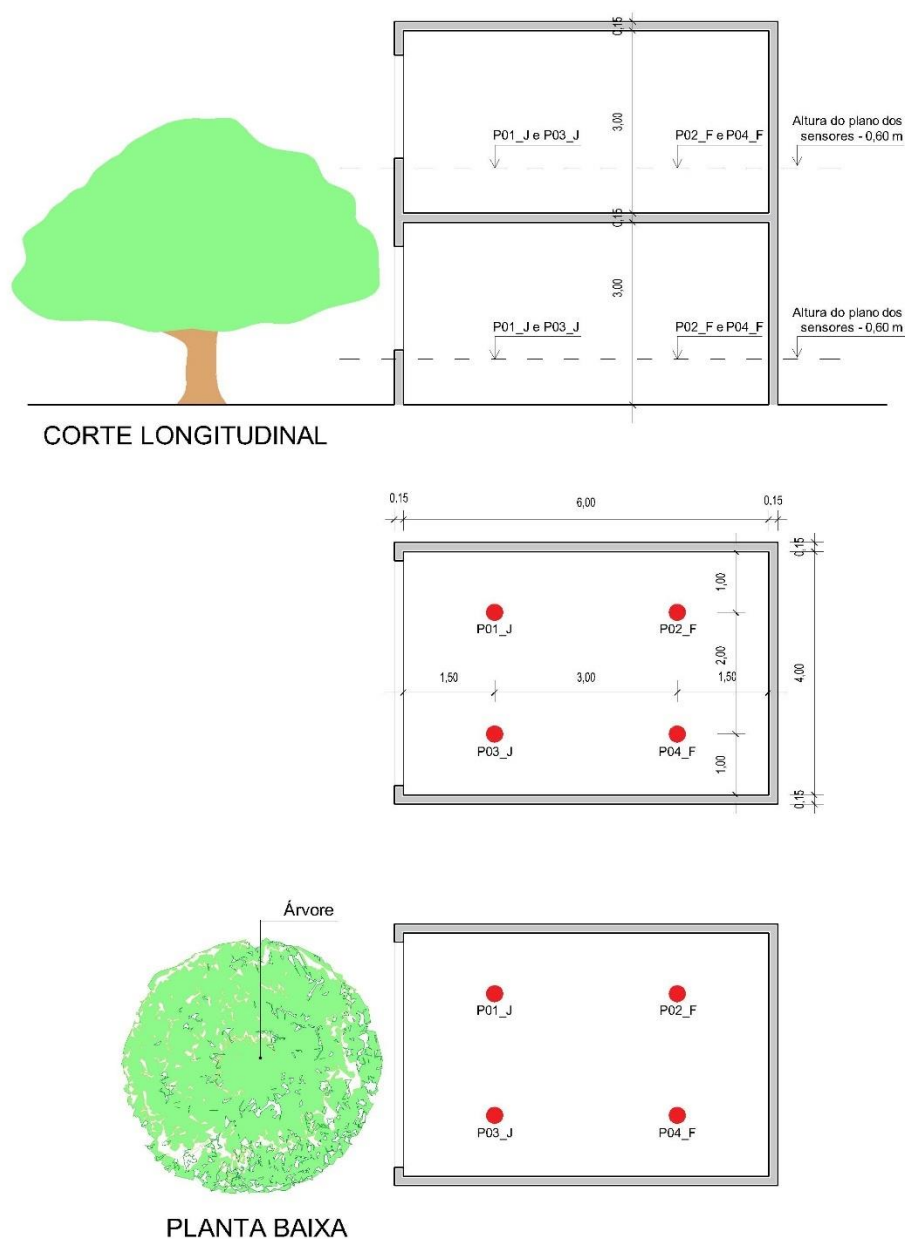
Fonte: dados da pesquisa, 2023.

3.1 Definição e caracterização do modelo em escala reduzida

Para a análise do impacto da vegetação arbórea na iluminação natural de ambientes internos, adotou-se uma configuração de ambientes hipotéticos simplificados. Para isto, foram utilizados dois modelos idênticos na escala de 1:20, constituídos cada um de dois ambientes – térreo e pavimento superior. Os ambientes têm formato retangular, medindo 4,00 de largura x 6,00 metros de profundidade e, 3,00 metros de pé direito. Em uma das fachadas de menor dimensão, foi considerada uma janela medindo 3,70 de largura x 1,70 de altura. Em um dos modelos, considerou-se a presença da árvore imediatamente em frente à janela (ver desenhos esquemáticos na Figura 18).

O modelo físico foi construído em MDF de 1,5 mm. Todas as bordas e juntas foram cuidadosamente seladas para evitar qualquer vazamento de luz, conforme recomendado por Schiler (1987). Para o revestimento de acabamento, utilizou-se papel branco (refletância de 80%) nas faces internas, exceto a superfície do piso, que recebeu revestimento com papel cinza (refletância de 40%).

Figura 18 – Desenhos esquemáticos da planta e corte do modelo utilizado. Localização dos pontos de medição/simulação da iluminância horizontal



Fonte: dados da pesquisa, 2023.

Para representar um modelo arbóreo em escala reduzida (1:20), foi utilizado um bonsai, réplica de uma árvore da natureza em miniatura. A espécie utilizada para representar uma árvore

real foi o *Buxus Harlandi*. Trata-se de um arbusto baixo e bastante ramificado procedente da china e regiões do mediterrâneo. Suas folhas são pequenas e arredondadas e possuem a coloração verde escura.

O *Buxus Harlandi* é uma espécie muito utilizada para a formação do bonsai shohin (pequeno tamanho) e hōkidachi (aparência de vassoura). Sua característica mais atraente é o aspecto envelhecido da casca que, com o tempo, forma várias fissuras profundas, dando ao bonsai uma aparência de um tronco muito antigo.

O bonsai utilizado tem altura total de aproximadamente 5,00 metros na escala de 1:20. A folha tem dimensões longitudinal e transversal de aproximadamente 0,35 e 0,15 cm, respectivamente (Figura 19). A copa apresenta altura de 3,00 metros e de 4,50 metros de largura.

Figura 19 – À esquerda – Desenho esquemático do bonsai; ao centro – Fotografia bonsai da espécie *Buxus*; à direita – Proporção da folha do *Buxus Harlandi* na escala 1:20

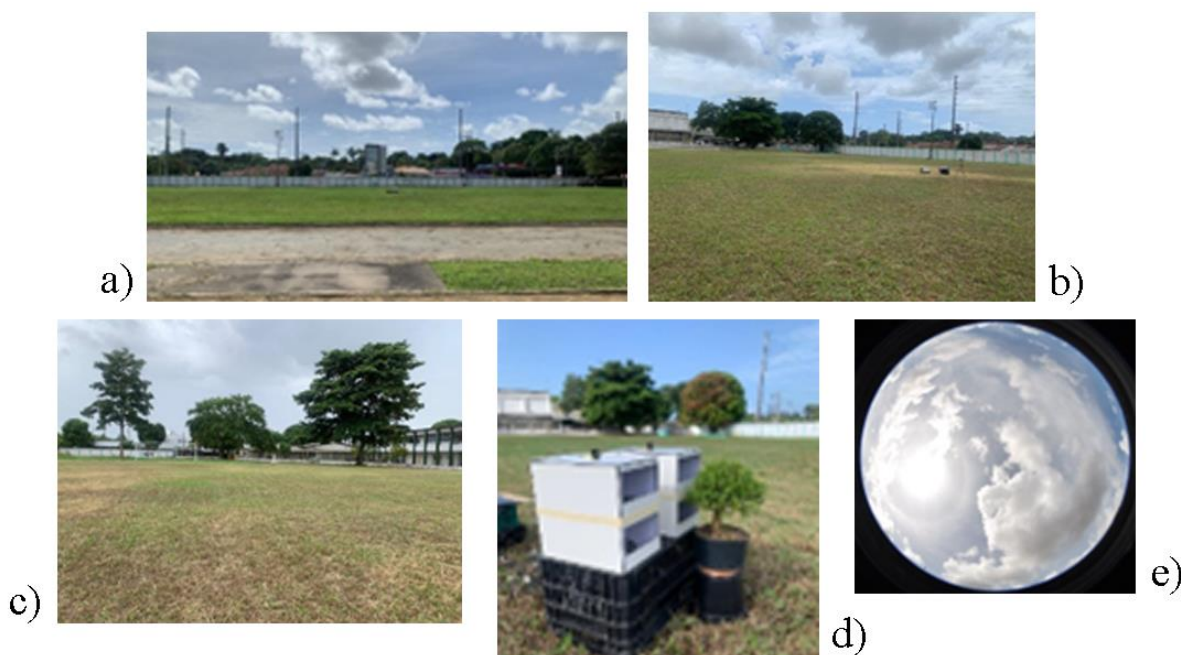


Fonte: dados da pesquisa, 2023.

A forma geométrica da copa pode variar conforme a estrutura dos galhos principais, densidade das ramificações e tipos de folhas. Desta forma, a copa desse bonsai pode ser classificada como árvore de copa geométrica larga e arredondada. A folha do *Buxus Harlandi* assemelha-se, em termos de formato e dimensões, a algumas espécies de árvores, como a mangueira (*Mangifera indica*). O comprimento da folha da mangueira varia de 12 a 38 centímetros, e a largura pode ser entre 2 a 13 centímetros. Segundo estas características, consideramos o bonsai utilizado como sendo uma árvore em escala reduzida devido a sua proporcionalidade entre seus elementos (folhas, galhos, tronco, copa).

O modelo físico da árvore e dos ambientes foram posicionados em área externa sob céu real e entorno com o máximo de desobstrução possível. Para isso, escolheu-se um campo de futebol localizado nas dependências do Instituto Federal da Paraíba, na cidade de João Pessoa, Paraíba, Brasil (latitude = -7.136182 e longitude = -34.872810). A figura 20 apresenta algumas fotografias do local das medições, do posicionamento das maquetes no local e uma imagem a partir da maquete orientada para o zênite, mostrando que o entorno não obstrui a visão do céu neste ponto.

Figura 20 – Local da realização das medições: a) Visão geral do campo de futebol; b) Vista orientada para nordeste; c) Vista orientada para sudoeste; d) Posicionamento das maquetes; e) Vista orientada para o céu a partir da maquete (visão do céu desobstruído)



Fonte: dados da pesquisa, 2023.

Desta forma, ficaram definidos, para análise, quatro cenários: dois pavimentos térreos, um com árvore e outro sem a presença da árvore, e dois pavimentos superiores, um com árvore e outro sem a presença da árvore (PTA – pavimento térreo com árvore; PT – pavimento térreo sem árvore; PSA – pavimento superior com árvore e PS – pavimento superior sem árvore).

Estas configurações de cenários foram escolhidas, levando em consideração que, em um primeiro momento, torna-se importante fazer uma análise, considerando a interferência do elemento vegetativo árvore na distribuição e desempenho da iluminação em ambientes internos. E, no segundo momento, considerando o objetivo principal deste trabalho, analisar o desempenho do modelo computacional de árvore desenvolvido, comparando medições sob céu real com simulações computacionais, tendo como referência os ambientes sem a presença da árvore, já que são configurações com elementos de pouca complexidade.

No cenário do pavimento térreo, a interferência da copa na iluminação natural será analisada como elemento de obstrução do céu e da luz solar direta. No pavimento superior, a árvore será considerada como um elemento que causa pouca ou nenhuma obstrução, mas que pode influenciar o desempenho da iluminação natural de forma reflexiva, como uma vegetação arbustiva, por exemplo.

3.2 Medições da luz natural sob céu real

As principais variáveis dependentes analisadas neste trabalho é a iluminância horizontal e a luminância observada no interior dos cenários em estudo. Foram realizadas medições de referência destas variáveis em pontos distribuídos no interior de cada cenário, considerando ou não a presença do modelo físico de árvore próximo à abertura lateral (janela). Esses dados foram tomados como referências para posterior validação de simulações computacionais. Os itens 3.2.1 e 3.2.2 descrevem detalhadamente todos os procedimentos.

3.2.1 LEVANTAMENTO DA ILUMINÂNCIA HORIZONTAL

Para o levantamento da iluminância horizontal, foram realizadas medições simultâneas em quatro pontos distribuídos no interior de cada ambiente – dois ambientes (pavimento térreo e superior) com a presença do modelo físico da árvore e dois ambientes (pavimento térreo e superior) sem a presença da árvore (ver esquema da Figura 18).

As maquetes foram posicionadas considerando o norte magnético, com declinação magnética² de 21° a oeste. As medições ocorreram considerando a abertura (janela) voltada para quatro orientações distintas – norte, sul, leste e oeste. Os registros foram realizados no período de 18 de fevereiro de 2022 a 18 de março de 2022 (período próximo ao equinócio). Por causa de algumas inconsistências nos dados causadas por interrupções das medições devido a chuvas, estes dias foram excluídos do banco de dados. O Quadro 6 apresenta os dias de medição considerados com as respectivas orientações e tipo de céu predominante.

Os dados de iluminância horizontal foram registrados das 9 às 15 horas, a cada 1 minuto. Esse horário foi estabelecido considerando a abrangência de todo o período do dia com níveis de iluminação natural mais significativos. Para cada orientação, foram coletados quatro dias de medição, resultando em 1680 registros de iluminância por orientação.

² Declinação magnética – medida do ângulo formado entre a direção do norte magnético, apontado pela agulha de uma bússola, com relação à direção do norte verdadeiro (geográfico). Uma declinação positiva ou leste significa que o norte magnético está desviado do norte verdadeiro no sentido horário. Uma declinação negativa ou oeste significa que o norte magnético está desviado no sentido anti-horário.

Quadro 6 – Dias das medições da iluminância horizontal com a orientação estabelecida e o tipo de céu predominante

Data da medição	Orient. da abertura	Tipo de céu predominante	Data da medição	Orient. da abertura	Tipo de céu predominante
18 de fev. de 2022	norte	Parcial	08 de mar. de 2022	norte	Claro
21 de fev. de 2022	sul	Parcial	10 de mar. de 2022	leste	Claro
22 de fev. de 2022	leste	Claro	11 de mar. de 2022	sul	Parcial
25 de fev. de 2022	oeste	Parcial	14 de mar. de 2022	norte	Encoberto
02 de mar. de 2022	norte	Claro	15 de mar. de 2022	sul	Claro
03 de mar. de 2023	sul	Claro	16 de mar. de 2022	oeste	Parcial
04 de mar. de 2022	leste	Parcial	17 de mar. de 2023	leste	Claro
7 de mar. de 2022	oeste	Parcial	18 de mar. de 2022	oeste	Claro

Fonte: dados da pesquisa, 2023.

Para os registros da iluminância horizontal, utilizou-se um conjunto de 18 sensores fotométricos Li-210 da LI-COR, fixados no interior da maquete (quatro sensores em cada cenário). A altura do sensor corresponde a 60 cm em escala real. Para a referência das condições externas de iluminação, dois sensores foram fixados na parte superior de cada maquete para registro da iluminância externa. Todos eles foram programados para realizar as medições simultaneamente (ver registro fotográfico na Figura 21). Os dados foram armazenados em seis dataloggers da LI-COR - Li 1400. As imagens e as especificações dos equipamentos podem ser visualizadas no Quadro 7.

Quadro 7 – Equipamentos utilizados para medições da iluminância

Equipamentos	Especificação
 Sensor fotométricos Li-210 da LI-COR  Dataloggers da LI-COR - Li 1400	Sensor fotométrico Calibração absoluta: $\pm 5\%$ Sensibilidade: Normalmente $30 \mu A$ por 100 klux Linearidade: Desvio máximo de 1% até 100 klux Estabilidade: $< \pm 2\%$ de mudança ao longo de um período de 1 ano Tempo de resposta: Menos de $1 \mu s$ Correção de cosseno: Cosseno corrigido até ângulo de incidência de 82° Azimuth: $< \pm 1\%$ de erro acima de 360° na elevação de 45° Faixa de temperatura operacional: $-40^\circ C$ a $65^\circ C$ Faixa de umidade relativa: 0% a 95% UR, sem condensação Detector: Detector fotovoltaico de silício de alta estabilidade (azul aprimorado) Invólucro do Sensor: Invólucro de alumínio anodizado à prova de intempéries com difusor de acrílico e hardware de aço inoxidável Tamanho: 2,36 cm de diâmetro x 3,63 cm (0,93" x 1,43") Peso: 24 g Comprimento do cabo: 2 m

Fonte: dados da pesquisa, 2023.

Figura 21 – Imagens da disposição dos modelos no momento das medições da iluminância

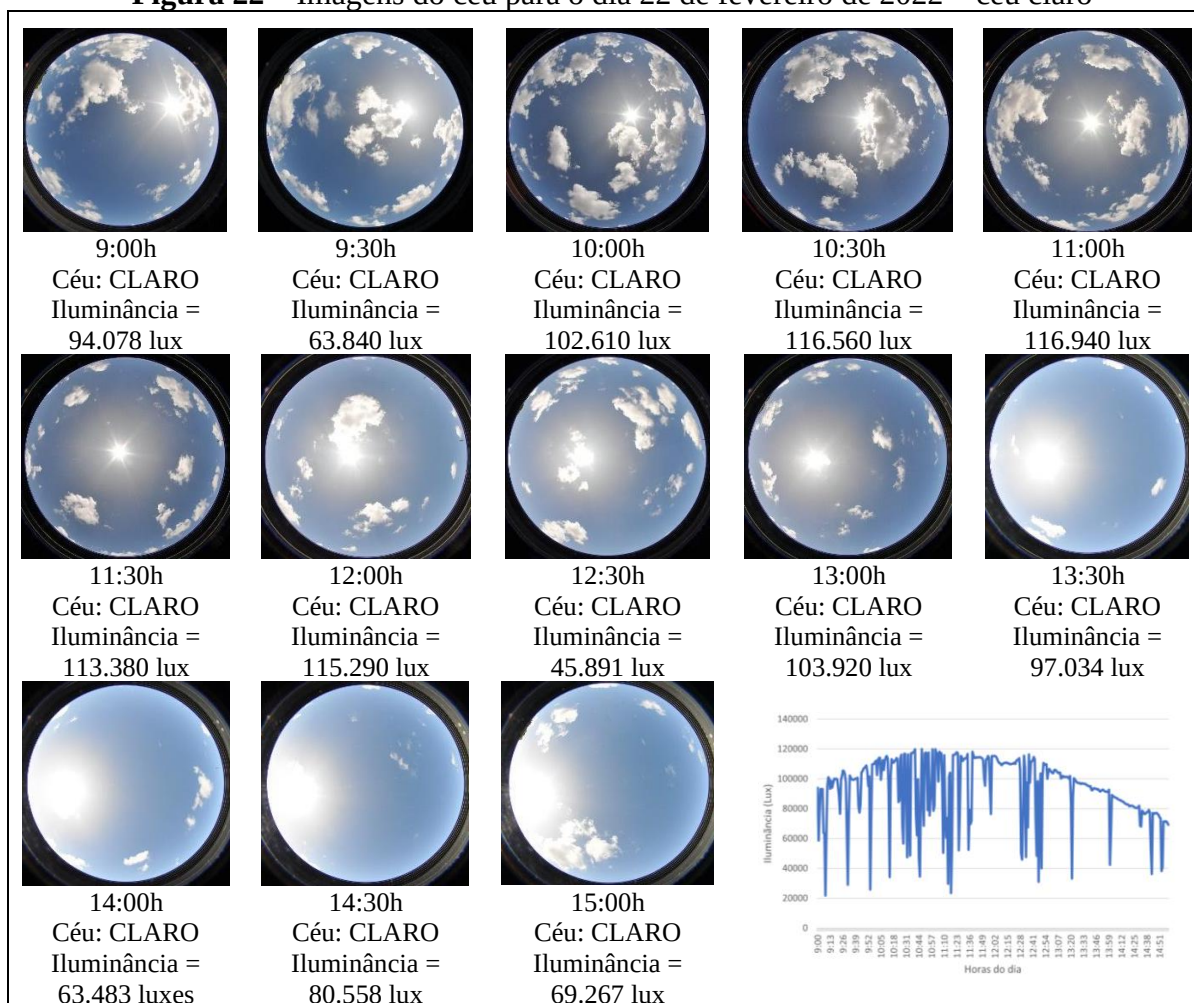


Fonte: dados da pesquisa, 2023.

Todos os equipamentos utilizados passaram por calibrações e análises, a fim de testar e validar seus registros. Desse modo, alguns equipamentos foram calibrados pelo Laboratório de Equipamentos Elétricos e Ópticos/CTMNE – IPT, enquanto os demais tiveram seus dados analisados com base nos equipamentos calibrados, sendo feitas equações de ajustes quando necessário.

Para classificar a condição do céu no momento da coleta dos dados, foram feitos registros fotográficos a cada 30 minutos para cada dia de medição. Para tanto, fez-se uso de uma câmera DSLR Nikon D90 e uma lente olho de peixe Sigma de 8mm. A câmera foi fixada em um tripé localizado sempre no lado posterior à maquete (ver Figura 21).

O método da cobertura do céu prescrito pela NOAA (*National Oceanic & Atmospheric Administration*) estabelece três tipos básicos de céu: claro, parcialmente encoberto e encoberto. É necessário o conhecimento destes modelos de céu para a avaliação da iluminação natural num ambiente, pois eles traduzem as possíveis variações da luz diurna. Qualificam-se os tipos de céu através do montante, em porcentagem, da cobertura de nuvens, onde o céu claro possui de 0 a 35%, o céu parcialmente encoberto possui de 35 a 75%, e o encoberto, de 75 a 100% de cobertura de nuvens. A Figura 22 apresenta o conjunto de registros para um dia de medição predominantemente claro (22 de fevereiro de 2022). Os registros fotográficos para os demais dias podem ser visualizados no Apêndice A.

Figura 22 – Imagens do céu para o dia 22 de fevereiro de 2022 – céu claro

3.2.1.1 Definição das métricas para análise da disponibilidade e distribuição da iluminância horizontal

A disponibilidade de iluminação natural foi avaliada por meio de métricas dinâmicas da luz do dia, que podem ser divididas em três indicadores (de acordo com a *Illumination Engineering Society* – IES): Autonomia Espacial da Luz do Dia (sDA), a Iluminância Útil da Luz do Dia (UDI) e Exposição Anual à Luz do Sol (ASE). Também foi avaliada segundo o Fator de Luz do Dia (DF).

A IES recomenda $sDA_{300/50\%}$ para análise de suficiência de luz natural, expressando a porcentagem de pontos da área analisada que atendem ou excedem o limite de iluminância horizontal de 300 lux por, pelo menos, 50% das horas ocupadas.

A iluminância útil da luz do dia (UDI) recomendada pela IES estabelece limite inferior igual a 100 lux e limite superior igual a 3000 lux. Estes limites serão adotados para as análises

do desempenho da iluminação natural neste trabalho.

Nas análises dos resultados desta pesquisa, a ASE foi considerada apenas para o intervalo de tempo estabelecido no decorrer das medições e, conseqüentemente, das simulações, não compreendendo, desta forma, as horas do ano inteiro.

Segundo a CIBSE (1999), a escala DF é interpretada sob céu nublado CIE com a seguinte classificação: < 2% – não iluminando adequadamente; entre 2% e 5% – iluminando adequadamente e > 5% – bem iluminado (mas o brilho e a luz solar direta podem causar problemas). Esta classificação foi adotada para as análises do fator de luz do dia desta pesquisa.

3.2.2 MAPEAMENTO DA LUMINÂNCIA ATRAVÉS DE IMAGENS HDR

Foram utilizadas imagens HDR e técnicas de pós-processamento que permitem apresentações gráficas de mapas de luminância das cenas estudadas, como também a verificação da probabilidade de ofuscamento dentro do campo de visão da câmera. Tais representações gráficas contribuem para a percepção e a compreensão do desempenho da iluminação natural no espaço. Com base nos procedimentos adotados por Pierson (2020), a partir do item 3.2.2.1 é apresentado o processo de calibração passo a passo, utilizado para gerar e calibrar uma imagem HDR, podendo ser usado para estudar a distribuição de luminância em uma cena interna com luz natural.

Para a realização desta etapa, foi necessária a manipulação de alguns equipamentos e *softwares*, conforme Quadro 8.

Quadro 8 – Equipamento e *softwares* utilizados para a construção e a manipulação de imagens HDR

Equipamentos	• Uma câmera fotográfica Nikon D90 • Uma lente olho de peixe circular Sigma 4.5mm f/2.8 • Um tripe para apoiar a câmera, garantindo que a câmera não se mova durante a sequência de exposições múltiplas • Um computador para controlar remotamente a câmera e processar as imagens • Um luminômetro KONICA MINOLTA e um alvo cinza • Oito sensores LI-COR LI 210R para medir a luminância vertical • Três dataloggers LI-COR LI-1400 para armazenar os dados de luminância
Softwares	• <i>qDslrDashboard</i> (HUBAI, 2014) para controlar remotamente a câmera; • Ferramentas do <i>Radiance</i> (WARD, 1987) para processar as imagens; • Photosphere (WARD, 1998) (disponível para IOS) para aplicar o ajuste fotométrico.

Fonte: dados da pesquisa, 2023.

Conforme recomendado por Inanici (2009) e Reinhard *et al.* (2006), as configurações da câmera foram definidas de acordo com Quadro 9 e mantidas constantes durante todo o processo de calibração e todos os mapas de luminância gerados posteriormente.

Quadro 9 – Configurações da câmera usada para capturar uma sequência de múltiplas exposições para fotografia HDR

Configuração	Valor
Velocidade do filme	ISO 100
balanço de branco	Luz do dia (5200K)
Modo de exposição	Manual
Modo de medição de luz	Insignificante
Modo de foco	Manual
Valor do foco	Infinito
Qualidade da imagem	grande
Tipo de imagem	JPEG ou RAW
Estilo de imagem	Neutro
Correção de iluminação periférica	Desabilitado
Cor	sRGB

Fonte: dados da pesquisa, 2023.

3.2.2.1 Procedimentos gerais

O Quadro 10 resume as etapas necessárias para gerar e calibrar uma imagem HDR com campo de visão de 180° para cenas com iluminação natural a partir de uma sequência de múltiplas exposições no formato jpeg, bem como os principais comandos utilizados nesta pesquisa que foram inseridos no Radiance (WARD, 1987).

Quadro 10 – Resumo das etapas e comandos inseridos no Radiance

ETAPA	LINHA DE CÓDIGO UTILIZADA
• Visualizar informações do cabeçalho da imagem	> getinfo imagem.hdr
• Anular valor de exposição do cabeçalho da imagem	> ra_xyze -r -o imagem.hdr > imagem_01.hdr
• Recorte de imagem HDR	> pcompos -x diâmetro -y diâmetro imagem_01.hdr -xleft -ydown > imagem_02.hdr
• Redimensionamento da imagem HDR	> pfilt -1 -x xdim -y ydim imagem_02.hdr > imagem_03.hdr
• Apagar cabeçalho da imagem HDR	> (getinfo < iamgem_03.hdr sed "/VIEW/d" && getinfo -< imagem_03.hdr) > imagem_04.hdr
• Inserir informações corretas no cabeçalho da imagem HDR	> getinfo -a "VIEW= -vta -vv 180° -vh 180°" < imagem_04.hdr > imagem_05.hdr
• Extrair o dado de iluminância vertical da imagem HDR	> evalglare -V Imagem_05.hdr

Fonte: dados da pesquisa, 2023.

3.2.2.1.1 Determinação das coordenadas e do ângulo de visão real da lente olho de peixe

Além do fato de que a borda de uma visão olho de peixe é, em geral, distorcida, o ângulo de visão real de uma lente olho de peixe pode não ser exatamente 180°, e o centro de uma visão olho de peixe pode não estar exatamente no centro da imagem (JACOBS, 2012). Para

determinar o ângulo de visão total de uma lente olho de peixe, o ponto sem paralaxe³ deve ser encontrado. No entanto, para este estudo, não foi possível cumprir esta etapa por falta de equipamentos adequados para tal procedimento. Sendo assim, assumiu-se que o ângulo de visão real da lente sigma Sigma 4.5 mm F2.8 é exatamente 180°.

Definidas por meio do Adobe Photoshop 2021, as coordenadas de visão olho de peixe são as coordenadas (em pixels) do canto inferior esquerdo do quadrado que abrange o ângulo de visão total, bem como o diâmetro da visão olho de peixe.

3.2.2.1.2 Determinação da função de resposta

A função de resposta da câmera é necessária para gerar uma imagem HDR quando as imagens LDR estão no formato jpeg. Segundo Hirning (2014), a função de resposta relaciona os valores de pixel às quantidades de luz recebidas. Cada câmera tem sua função de resposta específica, mesmo câmeras do mesmo modelo (JACOBS, 2007).

Depois que uma sequência de imagens LDR foi capturada, segundo as recomendações que constam em Pierson (2020), uma função de resposta da câmera foi extraída e salva por meio do Photosphere (WARD, 1998). Esta função foi, então, aplicada a cada imagem HDR produzida posteriormente.

3.2.2.1.3 Determinação da projeção e distorção da lente

As lentes olho de peixe projetam cenas 3D em imagens 2D com um tipo de projeção específico: equidistante, ângulo equisólido, ortográfica e estereográfica⁴. A lente de olho de peixe Sigma 4,5 mm F2.8, utilizada neste estudo, teoricamente, produz uma projeção

³ O ponto sem paralaxe ou ponto nodal – ponto da lente para o qual os raios que entram na lente devem convergir (PIERSON, 2020).

⁴ A projeção equidistante é uma projeção de ângulo igual para a qual a distância radial na imagem projetada é proporcional à distância angular. A distorção dos objetos é a mesma no centro da imagem projetada e em sua periferia.

A projeção ângulo equisólido mantém constante a relação entre o ângulo sólido do mundo real e a área na imagem capturada. A distorção dos objetos é mais ou menos a mesma no centro da imagem projetada e em sua periferia. A projeção ortográfica é a projeção onde o ponto de vista está a uma distância infinita. Apresenta linhas de projeção paralelas, mas não preserva área ou ângulo. Uma alta distorção de objetos (ou seja, uma redução de sua altura) é observada na periferia da imagem.

A projeção estereográfica é a projeção em um plano tangente ao zênite, onde o centro da projeção é o nadir (ou seja, o ponto diametralmente oposto ao zênite). Esta projeção amplifica a altura dos objetos na periferia da imagem.

equidistante (informação adquirida por meio da ficha técnica da lente). Com base no estudo experimental de Cauwerts (2012), ela possui projeção ângulo equisólido.

Como a função de projeção real difere das duas funções de projeção teórica mais comuns (ou seja, equidistantes ou ortográficas), uma função de distorção foi aplicada à imagem HDR para ajustar sua projeção. A função de distorção estabelece o deslocamento que deve ser aplicado a um pixel, de acordo com sua posição original, para obter uma projeção equidistante em uma imagem HDR.

Como o tipo de ângulo equisólido é um dos dois tipos de lentes mais amplamente disponíveis, a função de distorção para ajustar uma imagem HDR com projeção de ângulo equisólido para uma imagem HDR com projeção equidistante já foi definida por Ward (2016), conforme mostrado na equação 13.

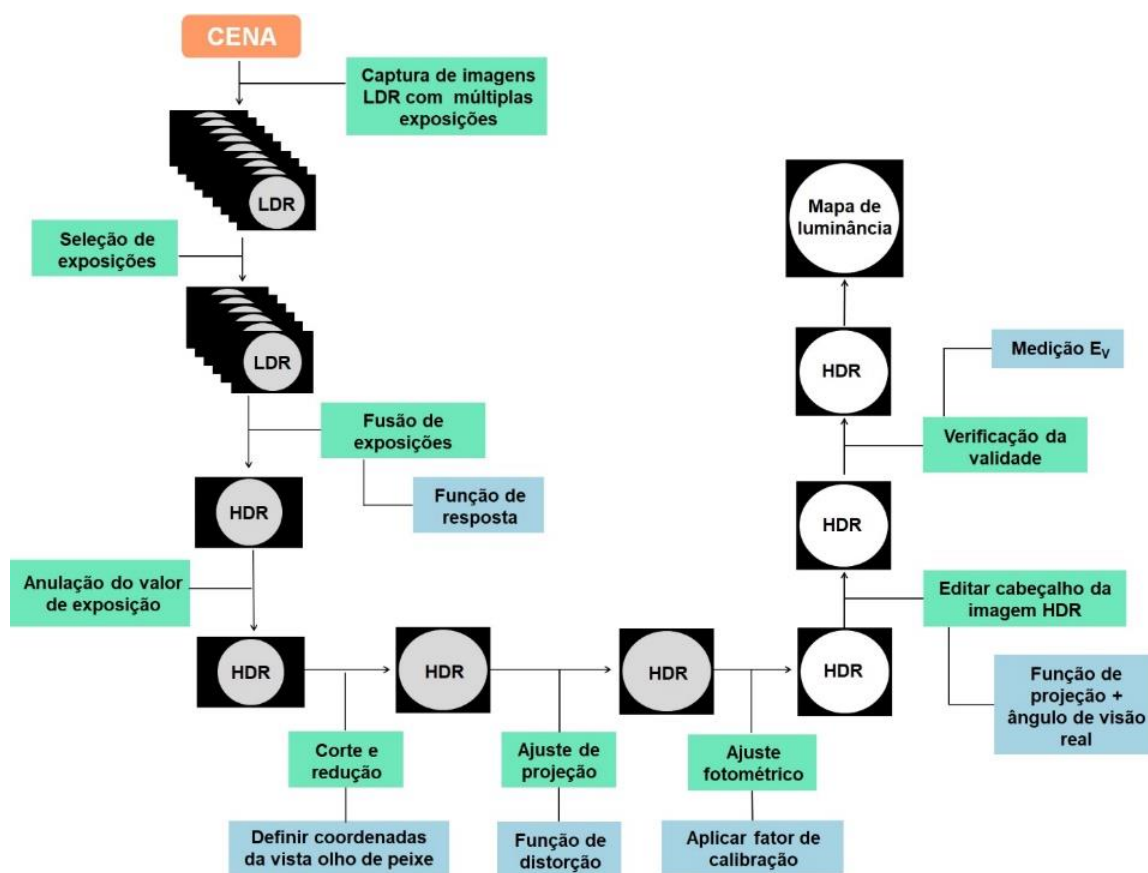
$$r_{equidistante} = \frac{2}{\pi} \cdot \text{sen}^{-1} \left(\sqrt{2} \cdot r_{\text{ângulo equisólido}} \right) \quad (13)$$

Onde $r_{equidistante}$ é a distância normalizada do eixo óptico para uma projeção equidistante (0 – 0,5); e $r_{\text{ângulo equisólido}}$ é a distância normalizada do eixo óptico para uma projeção de ângulo equisólido (0 – 0,5). Por fim, a função de distorção foi aplicada nos pixels da imagem HDR para fazer o ajuste.

3.2.2.2 Procedimento para construção da imagem HDR

O procedimento completo, adotado nesta pesquisa para criar um mapa de luminância de 180° a partir de uma cena com luz natural, é mostrado na Figura 23. Cada etapa do procedimento é descrita detalhadamente nos itens que seguem.

Figura 23 – Processo de construção de imagens HDR

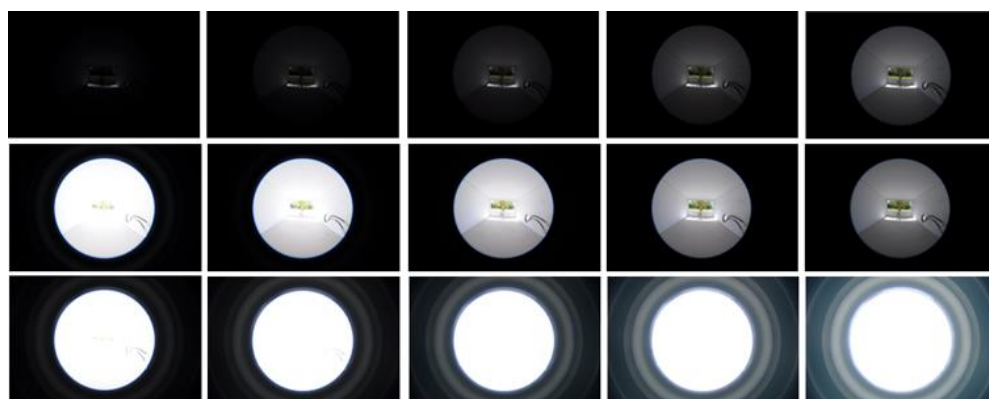


Fonte: adaptado de Pierson (2020),

3.2.2.2.1 Captura e seleção de imagens LDR com múltiplas exposições

Para gerar uma imagem HDR, foi capturada uma sequência de imagens LDR de múltiplas exposições. Essa sequência estendeu-se de uma imagem superexposta, quase branca, a uma imagem subexposta, quase preta, contendo 15 imagens LDR separadas por uma parada no valor de exposição (E_v). A Figura 24 apresenta uma das sequências de imagens LDR com múltiplas exposições.

Figura 24 – Sequência de 15 imagens LDR de exposição múltipla separadas por 1 parada EV



Fonte: dados da pesquisa, 2023.

Para fazer a sequência de imagens, a câmera foi colocada em um tripé para evitar problemas de desalinhamento durante a geração da imagem HDR. Todas as imagens foram salvas no formato jpeg. Embora a compactação jpeg cause a perda de muitos dados de cor, esse formato é capaz de preservar dados de luminância e é muito mais conveniente para armazenar (PIERSON, 2020).

Para capturar uma sequência de múltiplas exposições, foi utilizado o *bracketing*⁵ automático com controle remoto. As configurações de *bracketing* foram definidas por meio do *software* qDslrDashboard (HUBAI, 2014), instalado em um computador que controla remotamente a câmera. Desta forma, a captura das múltiplas exposições foi feita sem interrupção e sem risco de movimento entre as imagens. Os tempos de exposição das 15 fotos são 4s, 2s, 1s, 1/2s, 1/4s, 1/8s, 1/15s, 1/30s, 1/60s, 1/125s, 1/250s, 1/500s, 1/1.000s, 1/2.000s, 1/4.000s, conforme recomendam Jakubiec *et al.* (2016).

Por último, durante a captura da sequência de imagens, foram realizadas duas medições de luminância pontual, uma imediatamente antes e outra logo após a sequência, conforme recomenda Van Den Wymelenberg (2012). A luminância pontual foi medida em um cartão cinza de faixa intermediária localizado na cena durante a captura da sequência com um medidor de luminância (luminancímetro da Konica Minolta). Essa medida foi usada no final do processo de calibração para dimensionar os valores relativos de luminância incorporados na imagem HDR aos valores absolutos de luminância da cena.

Durante o processo de aquisição das imagens LDR, também foi realizada medição da iluminância vertical, conforme recomenda Pierson (2020). Desta forma, foram instalados dois sensores (LI-COR LI 210R) de iluminância próximos à lente da câmera (uma do lado esquerdo

⁵ *Bracketing* consiste em fazer três ou mais fotos de uma cena, com mesmo enquadramento, variando algum ajuste da exposição.

e outro do lado direito). Os sensores registraram a iluminância durante todo o período de captura das imagens. No final, foi atribuído um valor médio de iluminância para cada sequência de imagens adquirida. Este valor foi necessário para verificar a validade da imagem HDR calibrada.

A partir da coleta das 15 imagens LDR, algumas delas foram selecionadas, de forma que a exposição mais escura da sequência útil não tivesse valores de pixel R, G e B maiores que 228 (sem pixel branco), e a exposição mais clara não tivesse valores de pixel R, G e B abaixo de 27 (sem pixel preto) (recomendado por Pierson, 2020). Esta seleção foi realizada de forma manual no *software* Adobe Photoshop 2021.

3.2.2.2.2 Fusão de exposições

O processo de fusão de imagens LDR e geração de HDR a partir de arquivos jpeg consiste, primeiramente, em linearizar os valores de pixel em cada imagem LDR, cancelando a função de resposta da câmera. Em seguida, os valores de pixel de cada imagem LDR são divididos pelo tempo de exposição da imagem para trazer os valores de pixel para o mesmo domínio. Por fim, cada valor de pixel de cada imagem LDR é ponderado de acordo com seu valor, e os valores de pixel resultantes da imagem HDR são as médias entre exposições dos valores de pixel correspondentes ponderados (REINHARD *et al.*, 2006).

Para a fusão das imagens, foi utilizado o Photosphere para o sistema IOS. Nesta etapa, aplicou-se a função de resposta da câmera derivada e salva anteriormente, conforme descrito no item 3.2.2.1.2. Toda imagem HDR gerada apresenta um cabeçalho, no qual as configurações e parâmetros da imagem são armazenados. No Radiance, é possível visualizar as informações do cabeçalho de uma imagem HDR. A linha de código utilizada pode ser verificada no Quadro 10.

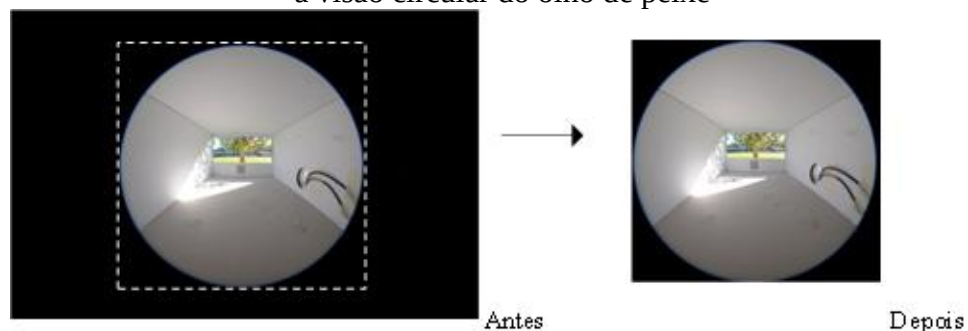
As informações do cabeçalho incluem o tipo de visualização, o ângulo de visualização e o valor da exposição da imagem. Essas entradas de cabeçalho foram modificadas em etapas seguintes, visto que não estavam corretas, pois são informações que não se podem recuperar das imagens LDR.

3.2.2.3 Processo de calibração de imagem HDR

Nesta etapa, primeiro foi anulado o valor da exposição da imagem, conforme comentado no item anterior. Este procedimento evita o problema de interpretação incorreta da exposição.

Pierson (2020) recomenda incluir o valor da exposição diretamente nos valores de pixel e remover completamente do cabeçalho da imagem. A linha de código inserida no Radiance para anular o valor de exposição de uma imagem HDR é apresentada no Quadro 10. Após esse procedimento, a imagem HDR foi recortada em formato quadrado, de forma que englobasse a visão circular do olho de peixe (ver exemplo na Figura 25).

Figura 25 – Corte de uma imagem HDR em um quadrado abrangendo a visão circular do olho de peixe



Fonte: dados da pesquisa, 2023.

Usando as coordenadas de visão olho de peixe definidas durante a execução dos procedimentos gerais, o corte da imagem HDR é realizado. Os valores de entrada necessários são as coordenadas (em pixels) do canto inferior esquerdo do quadrado abrangendo o ângulo de visão total, bem como o diâmetro de visão olho de peixe (em pixels). A linha de código para recortar a imagem HDR consta no Quadro 10.

Ao aplicar este comando, as entradas do cabeçalho para o tipo de vista e o ângulo de visão são marcadas como “inválidas” e precisaram ser ajustadas posteriormente, conforme consta no item 3.2.2.2.1.

Além disso, tornou-se necessário também fazer o redimensionamento da imagem, visto que o desempenho computacional cai ao processar imagens HDR maiores que 1500 x 1500 pixels, principalmente para análises de ofuscamento com o *Evalglare*. O redimensionamento de todas as imagens HDR, para uma resolução menor, foi feito por meio da linha de código que consta no Quadro 10.

Pierson (2020) enfatiza que, em aplicações para as quais a geometria da cena é relevante, geralmente, é preferível ter uma imagem HDR com uma das duas projeções teóricas mais comuns (ou seja, equidistante ou ortográfica). Segundo consta nas informações técnicas da lente olho de peixe utilizada neste estudo, trata-se de uma projeção equidistante, portanto, o ajuste de projeção é dispensável.

3.2.2.4 Ajuste fotométrico

A fotografia HDR permite capturar valores relativos de luminância de todos os pixels no campo de visão da lente (PIERSON, 2020). Para recuperar os valores absolutos de luminância da cena, um ajuste fotométrico foi aplicado a cada imagem HDR. Para tanto, foi realizada a medição da luminância pontual em um alvo (cartão cinza) durante cada captura do conjunto de imagens de exposições múltiplas (ver Figura 26).

Figura 26 – Cena com destaque para o alvo de medição da luminância pontual (cartão cinza)



Fonte: dados da pesquisa, 2023.

O ajuste da fotometria foi feito manualmente, por meio da Photosphere. Para isso, o alvo foi, primeiro, encontrado na imagem HDR no visualizador do Photosphere. Depois foi inserido o valor de luminância pontual medido durante a aquisição das imagens LDR. Em seguida, a calibração é aplicada automaticamente a cada pixel da imagem HDR inserindo o valor de luminância do ponto medido para a área de destino. O ajuste fotométrico foi, então, aplicado a cada imagem HDR. A Tabela 2 apresenta os valores de luminância pontual medidos e o fator de calibração aplicado a cada imagem.

Tabela 2 – Luminância pontual medida e fator de calibração aplicado a cada imagem HDR

		NORTE		SUL	
		Luminância (cd/m ²)	Fator de calibração	Luminância (cd/m ²)	Fator de calibração
9:00 h	PTA	1207,8	0,993445	179,6	1,13119
	PT	1247,9	1,13322	188,3	0,967916
	PSA	1047,7	0,974162	180,9	0,882759
	PS	1215,1	0,745801	246,7	1,06646
12:00 h	PTA	676,0	1,23568	172,2	1,05063
	PT	1496,5	0,969579	184,2	0,885883
	PSA	1355,0	1,01059	173,7	0,885883
	PS	1493,4	0,866874	214,3	1,00559
15:00 h	PTA	523,0	1,02872	159,9	1,5493
	PT	1364,9	0,964146	162,9	1,02086
	PSA	1344,1	1,03989	145,5	1,03256
	PS	1310,8	0,899406	163,8	1,01488

		LESTE		OESTE	
		Luminância (cd/m ²)	Fator de calibração	Luminância (cd/m ²)	Fator de calibração
9:00 h	PTA	467,4	0,951683	125,2	0,737637
	PT	1565,2	0,989717	154,4	0,802182
	PSA	1553,7	0,46296	130,2	1,42505
	PS	1671,8	1,15808	235,9	1,14146
12:00 h	PTA	154,3	1,08024	137,9	1,13157
	PT	189,3	0,938368	181,5	0,909773
	PSA	161,1	0,938368	176,4	0,909773
	PS	197,6	1,13057	200,7	1,11285
15:00h	PTA	136,1	0,893697	502,0	0,87212
	PT	174,9	0,932808	1336,3	0,96758
	PSA	154,6	0,932808	1240,1	1,1147
	PS	197,8	1,16361	1352,4	1,07863

Fonte: dados da pesquisa, 2023.

3.2.2.5 Edição de cabeçalho de imagem HDR

Informações corretas no cabeçalho da imagem HDR são essenciais para quase todas as análises posteriores. Como as informações de exibição armazenadas no cabeçalho não estão corretas, conforme já mencionado, as ferramentas de pós-processamento calcularão os ângulos (incluindo os ângulos sólidos) incorretamente, distorcendo os resultados. Por esse motivo, as informações de visualização foram ajustadas. As informações de visualização no cabeçalho consistem no tipo de projeção da lente, bem como no ângulo de visão total dela.

A primeira etapa, para ajustar as informações de exibição no cabeçalho da imagem HDR, foi apagar as informações existentes. A linha de código para apagar a entrada de exibição do cabeçalho de uma imagem HDR consta no Quadro 10. Em uma segunda etapa, as informações de exibição corretas foram inseridas de volta no cabeçalho da imagem HDR. A linha de código para definir as informações de visualização corretas também está descrita no Quadro 10.

Considerando que foi adotado, segundo o item 3.2.2.1 (Procedimentos gerais), que as imagens HDR geradas nesta pesquisa possuem ângulo de visão total de 180° e projeção ângulo equisólido modificada para projeção equidistante, as informações de exibição no cabeçalho da imagem HDR foram alteradas para “VIEW= -vta -vv 185° -vh 180°”.

3.2.2.6 Verificação de validade

Ao final do processo, cada imagem HDR foi verificada antes de ser utilizada como

mapa de luminância. A razão para isso é que, mesmo seguindo estritamente o processo passo a passo descrito, podem ocorrer erros significativos inesperados nas imagens HDR.

A verificação da validade das imagens HDR foi realizada por meio da comparação de iluminância vertical, recomendado por Pierson (2020). Este tipo de comparação verifica o equilíbrio luminoso para garantir que a energia de iluminação total incorporada na imagem HDR seja equivalente à energia de iluminação total que atinge um sensor de iluminância colocado próximo da lente.

A iluminância da imagem HDR foi extraída por meio do *Evalglare* e comparada com a leitura de iluminância do sensor. A linha de código para recuperar o valor de iluminância de uma imagem HDR usando *Evalglare* consta no Quadro 10.

Segundo Pierson (2020), quando o erro entre os valores de iluminância medidos pelo sensor e derivados de uma imagem HDR for maior que 25%, embora o processo de calibração tenha sido conduzido meticulosamente, isso, provavelmente, significa que, para algumas áreas da imagem HDR, a luminância está acima ou subestimado. No caso específico em que o valor de iluminância medido é significativamente maior do que o valor derivado de HDR e há um ponto muito brilhante no campo de visão, como o sol, a subestimação da luminância pode ser explicada pelo estouro de pixel na imagem HDR. A Tabela 3 apresenta os dados de iluminância vertical medido e derivados das imagens HDR com os respectivos erros médios calculados (Equação 14).

$$\varepsilon_{I_{lum.vertical}}(\%) = \frac{(I_{lum.HDR} - I_{lum.medida})}{I_{lum.medida}} \cdot 100 \quad (14)$$

Onde $\varepsilon_{I_{lum.vertical}}$ é o erro na iluminância vertical (%); $I_{lum.HDR}$ é a iluminância vertical derivada de HDR (lux), e $I_{lum.medida}$ é a iluminância vertical (lux) medida pelo sensor.

Tabela 3 – Iluminância vertical medida e derivados das imagens HDR com os respectivos erros médios

		NORTE			SUL		
		Ilum. Vertical medida (lux)	Ilum. Vertical HDR (lux)	Erro (%)	Ilum. Vertical medida (lux)	Ilum. Vertical HDR (lux)	Erro (%)
9:00 h	PTA	3018,8445	3666,556	21,45561	1333,9515	1211,948	-9,146
	PT	3359,0025	4560,561	35,7713	1639,155	1623,71	-0,94224
	PSA	4163,775	4123,98	-0,95575	1744,302	1470,182	-15,7151
	PS	3578,19	4281,94	19,66776	1497,195	1775,017	18,55616
	PTA	2903,796	3578,679	23,24141	1809,045	1655,681	-8,47763
12:00 h	PT	5299,98	6380,368	20,38477	1756,167	1629,962	-7,18641
	PSA	5933,0985	5811,26	-2,05353	1994,034	1618,765	-18,8196

15:00 h	PS	5337,255	6305,345	18,13834	2610,93	2007,802	-23,1001
	PTA	3405,885	3661,298	7,499175	1475,8065	1453,238	-1,52924
	PT	6963,285	9066,184	30,19981	1945,2405	1624,443	-16,4914
	PSA	7985,901	9660,795	20,97313	1631,1225	1446,405	-11,3245
	PS	7824,39	9405,041	20,20159	1336,23	1611,1	20,57056
		LESTE			OESTE		
		Ilum. Vertical medida (lux)	Ilum. Vertical HDR (lux)	Erro (%)	Ilum. Vertical medida (lux)	Ilum. Vertical HDR (lux)	Erro (%)
9:00 h	PTA	2625,966	2894,223	10,21557	1360,926	1055,488	-22,4434
	PT	7267,155	9607,004	32,1976	1476,825	1539,625	4,252396
	PSA	8591,8035	9129,22	6,254989	1585,5525	1325,764	-16,3847
	PS	8501,64	12514	47,1951	2019,465	1974,657	-2,21881
12:00 h	PTA	1127,721	1275,386	13,09408	961,6425	988,3605	2,778368
	PT	1670,4975	1974,384	18,19138	1256,325	1540,232	22,59824
	PSA	1900,4475	1637,018	-13,8614	1678,9815	1526,169	-9,10149
	PS	1642,83	1907,398	16,10442	1222,305	1689,119	38,19125
15:00 h	PTA	1219,8375	1331,289	9,136546	2909,9805	3528,934	21,27002
	PT	1830,57	2146,005	17,23153	6091,26	9225,823	51,46001
	PSA	1579,1685	1763,112	11,6481	7567,7175	9166,146	21,12167
	PS	3048,57	2383,45	-21,8174	6722,94	9657,839	43,65499

Fonte: dados da pesquisa, 2023.

Nota-se que, das 48 imagens analisadas, apenas 7 apresentaram erros superiores a 25% (apenas 14,58% dos mapas de luminância). Estes erros podem ser observados, principalmente, nas orientações e horários em que há incidência de luz solar direta dentro do ambiente, ou seja, níveis de luminância mais elevados. É o caso da orientação oeste no período da tarde e da orientação leste no período da manhã.

Para verificar a correlação que existe entre a iluminância vertical medida e extraída das imagens HDR, foi aplicado o teste não paramétrico de correlação de Spearman, já que se trata de conjuntos de dados com distribuição não normal, segundo o teste de Shapiro-Wilk. Com o resultado da correlação apresentado na Parte 4 desta tese, optou-se por não excluir as cenas com erros maiores que 25% das análises gerais.

3.2.3 DEFINIÇÃO DA MÉTRICA DE OFUSCAMENTO

Para avaliar o ofuscamento usando imagens HDR, foi utilizado o *Evalglare*, desenvolvido por Wienold e Christoffersen (2005), o qual analisa uma cena de ofuscamento usando os cinco índices de ofuscamento e identifica potenciais fontes de ofuscamento com base em um valor limite.

O Quadro 4 (Capítulo II) mostra diferentes faixas de pontuação dos cinco índices de

ofuscamento para categorizar diferentes níveis. Pontuações mais baixas representam níveis mais baixos de ofuscamento de desconforto, exceto para VCP, em que uma pontuação mais alta representa melhor conforto visual. Estes limites foram adotados nesta pesquisa como parâmetro para as análises de ofuscamento.

Jakubiec e Reinhart (2012) afirmam que, entre os cinco índices apresentados acima, o DGP mostra os resultados mais robustos para a maioria das situações de luz do dia. O VCP não se destina a ser usado para cálculos de ofuscamento à luz do dia, e o CGI tende a superestimar os níveis de ofuscamento. DGI e UGR podem ser usados para avaliação do ofuscamento da luz do dia, mas funcionam apenas quando a luz solar direta não entra. Sabendo disso, nesta pesquisa, as análises do ofuscamento serão pautadas apenas no índice de DGP, embora os demais índices também tenham sido extraídos a partir das imagens HDR. Eles podem ser consultados no Apêndice B.

3.3 Construção do modelo arbóreo computacional simplificado

Para a realização das simulações computacionais, foi necessário fazer a reconstrução tridimensional do modelo arbóreo utilizado nas medições (o bonsai). A partir de uma revisão sistemática da literatura sobre técnicas de mapeamento 3D específicas que podem ser empregadas (ver Capítulo II), identificaram-se duas principais: a tecnologia LiDAR e a técnica baseada em fotogrametria (*Structure from motion* – SfM).

Mediante pesquisas no sistema global de redes de computadores (Internet), constatou-se a existência de diversos aplicativos para dispositivos móveis em nível de consumidor, com base na tecnologia LiDAR e em fotogrametria. A partir disso, foi escolhido o Polycam, um aplicativo de escaneamento 3D para dispositivos iOS. Ele permite aos usuários escanear objetos em 3D usando o *hardware* de câmera do dispositivo e produzir modelos 3D detalhados através da fotogrametria ou tecnologia LiDAR, a depender das configurações do dispositivo iOS que está sendo utilizado.

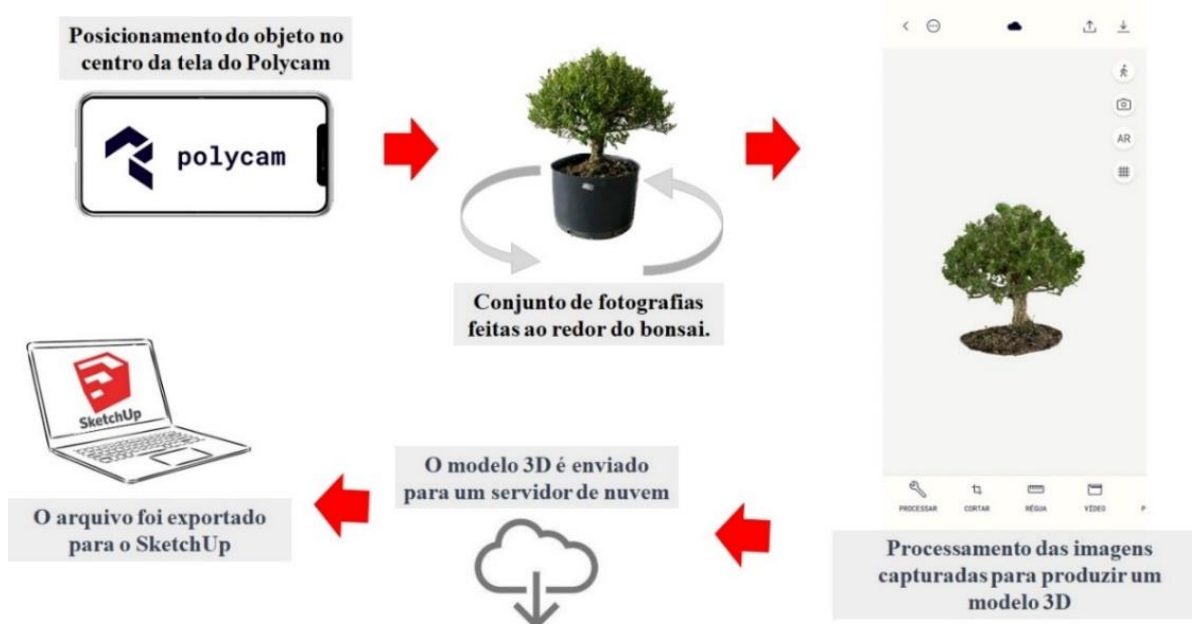
O Polycam é reconhecido por sua facilidade de uso. Além disso, ele oferece uma variedade de ferramentas de pós-processamento para aprimorar e personalizar os modelos 3D escaneados. O resultado final pode ser visualizado, compartilhado ou exportado para outros aplicativos ou formatos de arquivo. Seguem algumas das especificações gerais do Polycam: sistema operacional – iOS 11.0 ou posterior; compatibilidade com dispositivos – iPhones e iPads com câmera traseira; resolução de escaneamento – depende da qualidade da câmera de seu dispositivo; formatos de arquivo de saída – OBJ, STL, PLY, glTF; as ferramentas de pós-

processamento incluem os ajustes de geometria, suavização, remoção de buracos e outras ferramentas para melhorar o modelo 3D escaneado.

Foi utilizado o Polycam instalado em um Iphone XR. Como este dispositivo não tem suporte para a tecnologia LiDAR, foi utilizado o aplicativo na versão de fotogrametria. O Polycam aplica o método de SfM para imagens de alcance próximo com certas sobreposições (mais de 50%) para gerar o modelo 3D.

O aplicativo oferece duas opções para capturar imagens: modo manual e automático. Foi recomendado o modo automático com uma única gravação durante a captura da estrutura do bonsai. No modo automático, o aplicativo pode calcular a taxa de sobreposição automaticamente, capturando-se, em seguida, as imagens quando for necessário. Depois da obtenção das imagens, o aplicativo faz o processamento no servidor de nuvem para transformá-las em um modelo 3D. Este processo está resumido na Figura 27. A Figura 28 apresenta uma sequência de imagens do modelo 3D do bonsai visualizado no Polycam.

Figura 27 – Processo de construção do modelo tridimensional do bonsai utilizando o Polycam



Fonte: dados da pesquisa, 2023.

Figura 28 – Sequência de imagens do modelo 3D do bonsai a partir do aplicativo Polycam



Fonte: dados da pesquisa, 2023.

Após a construção do modelo no Polycam, foi realizada a exportação para o *SketchUp* Pro 2021 em formato 3DS, no qual foi feito o refinamento do modelo, limpando os excessos e separando a copa do tronco e galhos em grupos distintos (ver Figura 29). Os materiais correspondentes às folhas e ao tronco não foram aplicados neste momento, apenas diferenciada as cores dos grupos (copa e tronco).

Figura 29 – Imagens do modelo 3D do bonsai após ajustes no *SketchUp*

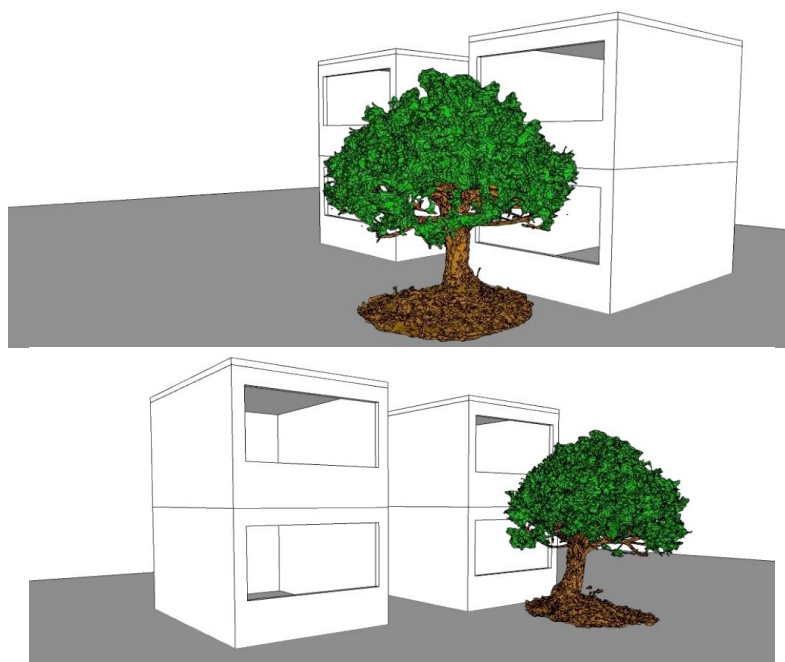


Fonte: dados da pesquisa, 2023.

Nesta fase, também foi reproduzido o modelo computacional da maquete física que representa os cenários estudados. Também foi utilizado o software de modelagem (*SketchUp*

Pro 2021). As características dimensionais do modelo computacional seguiram estritamente a maquete física considerando a escala de 1:20. Por último, o modelo computacional da árvore e da maquete foram incorporados em um mesmo arquivo e posicionados conforme adotado com os modelos físicos (ver Figura 30).

Figura 30 – Modelo 3D dos cenários com o posicionamento da árvore



Fonte: dados da pesquisa, 2023.

Os materiais empregados em cada uma das superfícies só foram definidos na fase seguinte, a de simulação computacional. Deste ponto em diante, o modelo computacional foi importado para o Rhinoceros 3D (Lagios *et al.*, 2010) para a realização das simulações computacionais da luz natural com o *plugin ClimateStudio*. Todo o processo envolvendo as simulações computacionais está descrito no item 3.4, que segue.

3.4 Simulações computacionais

A fim de validar o modelo 3D de árvore, desenvolvido e descrito no item 3.3, foi necessária a utilização de simulações computacionais da luz natural, para posterior comparação com as iluminâncias obtidas com as medições de campo.

Para avaliar as condições de luz do dia nos cenários em períodos específicos e/ou ao longo do ano, a modelagem de luz do dia baseada no clima é realizada por meio da ferramenta ClimateStudio V.1.0.7, da Solemma LLC, com mecanismo de cálculo do Radiance (SOLEMMA, 2020).

O ClimateStudio implementa uma versão modificada do Radiance que se baseia no modo de rastreamento de caminho progressivo, ou seja, apenas alguns caminhos de raio são traçados por vez – em vez de todos os caminhos de luz possíveis – antes de calcular um resultado. Os resultados são atualizados progressivamente até que a convergência seja alcançada, mantendo o mesmo nível de precisão das interfaces tradicionais baseadas em Radiance, como Daysim e DIVA (SOLEMMA, 2020).

As simulações são executadas usando o céu de Perez, que descreve a distribuição de luminância relativa da abobada celeste com base nos valores medidos de irradiância horizontal difusa normal e difusa no local sob investigação (PEREZ *et al.*, 1987).

Seguindo o fluxo de trabalho do ClimateStudio, algumas configurações foram realizadas. Primeiro, a geolocalização e os dados meteorológicos para a cidade de João Pessoa, Paraíba, Brasil, foram definidas. O ClimateStudio usa arquivos climáticos de Ano Meteorológico Típico (TMY), que contêm dados horários. O arquivo climático de João Pessoa foi baixado a partir de *climate.onebuilding.org* (2022). Este site contém dados climáticos projetados especificamente para dar suporte a simulações computacionais e são publicados por várias organizações. Os dados do arquivo TMY utilizado nas simulações deste estudo são derivados dos últimos 15 anos (2007-2021).

Os materiais de acabamento das paredes, piso e teto, como também da árvore e o piso externo (gramado), foram selecionados a partir da biblioteca do ClimateStudio. Suas características são semelhantes às dos materiais da maquete física (Tabela 4).

Tabela 4 – Valores da métrica de conforto visual

Elemento	Rugosidade	Refletância	Reflexão difusa	Reflexão especular
Parede	0,2	79,8 %	79,41%	0,39%
Teto	0,2	79,8 %	79,41%	0,39%
Piso	0,3	41,79	41,59	0,19%
Copa da árvore	0,2	13,8%	13,7%	0,1%
Tronco da árvore	0,3	4,0%	4,0%	0%
Piso externo (Gramado)	0,2	15,7%	15,6%	0,11%

Fonte: dados da pesquisa, 2023.

A rotina de ocupação foi definida entre 6 e 18 horas. Foram realizadas simulações considerando as quatro orientações (norte, sul, leste e oeste), como ocorreu na etapa de medição de campo. Após estas configurações, as simulações ocorreram em duas etapas: disponibilidade de iluminação natural e ofuscamento.

A primeira etapa das simulações consistiu na verificação da distribuição da iluminação natural através da iluminância horizontal. Os pontos de análise foram definidos conforme distribuição dos sensores na etapa de medições, com quatro pontos em cada ambiente (ver

Figura 18).

Nesta etapa, as métricas anuais de iluminação natural obtidas foram as mesmas consideradas na etapa de medições sob céu real (ver item 3.2.1.1): Autonomia Espacial da Luz do Dia (sDA), a Iluminância Útil da Luz do Dia (UDI) e Exposição Anual à Luz do Sol (ASE). Além disso, um arquivo com extensão .csv foi extraído com informações horárias da iluminância horizontal. Com estes dados, foi possível fazer análises comparativas em períodos selecionados, já que as medições de campo compreenderam os meses de fevereiro e março.

A segunda etapa das simulações consistiu na análise do ofuscamento por meio da métrica *Daylight Glare Probabilista* (DGP), desenvolvida por Wienold e Christofferen. Esta métrica foi calculada usando uma renderização olho de peixe com um ângulo de abertura de 180 graus. Para estas simulações, o ClimateStudio conta com a porção de iluminância vertical da fórmula DGP.

Da mesma forma que na etapa anterior, nesta também foi extraído um arquivo .csv com informações horárias do DGP, sendo possíveis as análises comparativas em períodos selecionados. Também foram gerados mapas de luminância com cores falsas para datas e horários específicos (correspondentes ao período das medições de campo).

Todos os dados obtidos com as simulações foram tabulados e organizados em planilhas do Microsoft Excel para análises posteriores, conforme descrito no item 3.5.

3.5 Análise dos resultados

Os dados desta pesquisa são provenientes de duas fontes: medições sob condições de céu real e simulações computacionais da luz natural. As principais variáveis dependentes analisadas foram a disponibilidade e distribuição da iluminação natural por meio da iluminância horizontal e mapas de luminâncias, através dos quais foi analisado o ofuscamento.

As análises dos resultados dividem-se em três etapas principais: a análise do impacto da vegetação arbórea na disponibilidade e qualidade da iluminação natural a partir dos dados coletados em campo. As análises das simulações computacionais, onde foram estudadas as mesmas variáveis consideradas em um mesmo contexto que foi reproduzido virtualmente. E, por último, as análises que buscam validar os resultados das simulações computacionais, verificando em que medida o modelo geométrico virtual da árvore representa adequadamente a árvore real utilizada na etapa da coleta de campo.

Os procedimentos de tabulação e organização dos dados foram realizados utilizando o

software Microsoft Excel, e os procedimentos de análises dos dados foram realizados utilizando o *software* RStudio.

Este estudo compreende dois tipos de análise: exploratória e estatística. A avaliação da luz natural em arquitetura comumente utiliza a análise exploratória de resultados como método de estudo. A elaboração de tabelas e gráficos é importante para compreender o comportamento de parâmetros de entrada e saída, seja em modelos computacionais ou em uma pesquisa de campo.

A análise exploratória foi realizada, inicialmente, a partir da observação do impacto da vegetação arbórea na disponibilidade da iluminação natural frente às variáveis estudadas nesta pesquisa (iluminância horizontal e luminância), levando em consideração as orientações definidas.

Nesta etapa, por meio da estimação da tendência central dos dados, são feitas as estimativas de localização para as variáveis consideradas. São analisados os seguintes parâmetros: valor mínimo, 1ª quartil, mediana (estimativa mais robusta por não ser enviesada por dados espúrios), média (aritmética simples), média aparada com 10% (apara 10% das observações iniciais e finais, criando, deste modo, uma proteção contra dados extremos), 3º quartil e valor máximo.

Em seguida, observou-se a variabilidade dos registros, medindo a dispersão destes, ou seja, se são dados compactados ou espalhados. Para tal, a estimativa de variação usada foi o desvio padrão, com o intuito de identificar a diferença entre a estimativa de localização e o dado observado. Por último, foi verificada a distribuição dos dados, por meio dos percentis, com o auxílio do gráfico boxplot e da frequência com os histogramas. É possível visualizar o *script* utilizado no RStudio no Apêndice B.

Em um segundo momento, foi investigado o comportamento das métricas de desempenho qualidade da iluminação natural nos cenários estabelecidos. As métricas definidas para este fim foram a autonomia espacial da iluminação natural (sDA – *Spatial Daylight Autonomy*), exposição anual à luz do sol (ASE – *Annual Sunlight Exposure*), o fator de luz do dia (DF – *Daylight Factor*), a Iluminância útil da Luz do Dia (UDI – *Useful Daylight Illuminances*) e a probabilidade de ofuscamento (DGP – *Daylight Glare Probability*).

Com o objetivo de verificar o grau de influência de algumas variáveis independentes (presença ou não da árvore, orientação, pavimento, turno) no desempenho da luz natural nos cenários estudados, foi obtido um modelo de regressão logística binária. Também foi analisada

a curva ROC⁶ para este modelo.

Para as análises comparativas entre medições e simulações, no banco de dados das simulações foi realizado um recorte temporal de forma que correspondesse ao período do ano em que foram realizadas as medições de campo. Os dados resultantes das medições e simulações foram inseridos em planilhas elaboradas de acordo com a parametrização pré-definida. Este tratamento de dados foi necessário para posterior montagem dos gráficos inerentes à análise exploratória.

Para validar os resultados obtidos com as simulações computacionais e confirmar estatisticamente em que medida o modelo 3D virtual da árvore é um representante adequado do modelo arbóreo em escala reduzida utilizado nas medições de campo, foi realizada a análise estatística dos dados, a partir de teste de hipótese de Mann-Whitney, correlação Spearman (ρ)⁷ e os indicativos estatísticos raiz quadrada do erro médio – RMSE e o erro absoluto médio – MBE.

Considerando que foram rejeitados os pressupostos da distribuição normal dos conjuntos de dados, verificado a partir do teste de Shapiro-Wilk, o teste não paramétrico de Mann-Whitney foi aplicado, a fim de verificar chances de semelhanças ou diferenças entre a iluminância horizontal medida e simulada (amostras independentes), estimando margens de erro com limites superior e inferior a 5% do valor esperado (intervalos de confiança de 95%). O tamanho do efeito foi verificado segundo o método de linguagem comum⁸, conforme descreve Kerby (2014).

A correlação entre a média horária da iluminância medida e simulada também foi analisada por meio do coeficiente de Spearman. Esse tipo de correlação considera as posições que os valores ocupam quando ordenados na forma crescente ou decrescente. Nesta pesquisa,

⁶ As curvas ROC plotam a taxa de verdadeiro positivo (TPR ou sensibilidade) em relação à taxa de verdadeiro negativo (TNR ou especificidade), que indica a taxa de predição. O valor AUC (área sob a curva) é outro indicador de desempenho que mostra a capacidade de distinguir entre os dois níveis de uma variável binária, com um valor mais alto correspondendo a um melhor modelo de previsão. Com relação à interpretação do valor de AUC, Hosmer-Lemeshow (2005), classifica valores > 0,7 como aceitáveis, valores > 0,8 como excelentes e Safari et al. (2016), descrevem valores entre 0,6 e 0,7 como ruins.

⁷ O coeficiente de correlação de postos de Spearman, denominado pela letra grega ρ (rho), é uma medida de correlação não paramétrica. Ao contrário do coeficiente de correlação de Pearson não requer a suposição que a relação entre as variáveis é linear, nem requer que as variáveis sejam quantitativas; pode ser usado para as variáveis medidas no nível ordinal.

⁸ Tamanho do efeito em linguagem comum – TDE-LC (McGraw e Wong, 1992) converte o efeito numa percentagem. De forma exemplificativa, corresponde à probabilidade de uma pessoa retirada ao acaso do grupo alvo ter uma pontuação superior a uma pessoa retirada ao acaso do grupo de comparação (KERBY, 2014).

foram adotados os critérios para a interpretação dos valores de correlação, conforme Cohen (1988) e Field (2009): com valores entre 0,10 e 0,29, a correlação pode ser considerada fraca; com escores entre 0,30 e 0,49, a correlação pode ser considerada média; valores entre 0,50 e 1 podem levar a correlação a ser interpretada como forte.

Para cada ponto de medição, foi analisado comparativamente o comportamento da iluminância horizontal medida e simulada em função da hora. Foi realizada uma análise das diferenças encontradas entre medição e simulação, descrevendo os erros em relação às medições de referência. Para isso, foram utilizados os indicadores estatísticos raiz quadrada do erro médio – RMSE (*Root Mean Square Error*) e o erro absoluto médio – MBE (*Mean Bias Error*), definidos pelas equações 15 e 16.

$$MBE = \frac{\sum(IL_s - IL_m)}{\sum IL_m} \cdot 100 \quad (15)$$

$$RMSE = \frac{\sqrt{\frac{\sum(IL_s - IL_m)^2}{n}}}{\frac{\sum IL_m}{n}} \cdot 100 \quad (16)$$

Onde IL_s é o valor simulado e IL_m é o valor medido.

De acordo com Reinhart (2009), estes indicadores caracterizam as semelhanças e/ou diferenças entre dois conjuntos de dados. O RMSE é a medida da magnitude média dos erros estimados, tem valor sempre positivo, e, quanto mais próximo de zero, maior a qualidade da iluminância simulada. O MBE indica o quanto a iluminância simulada está sendo subestimada (valor negativo) ou superestimada (valor positivo) em relação à iluminância medida. O ideal é que o valor de MBE tenda a zero.

Para validar os resultados produzidos por meio do MBE e RMSE, tomaram-se, como referência, os resultados de estudo de Reinhart e Breton (2009), que consideram os resultados das simulações confiáveis se o MBE for inferior a 15% e o RMSE for inferior a 35%.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES

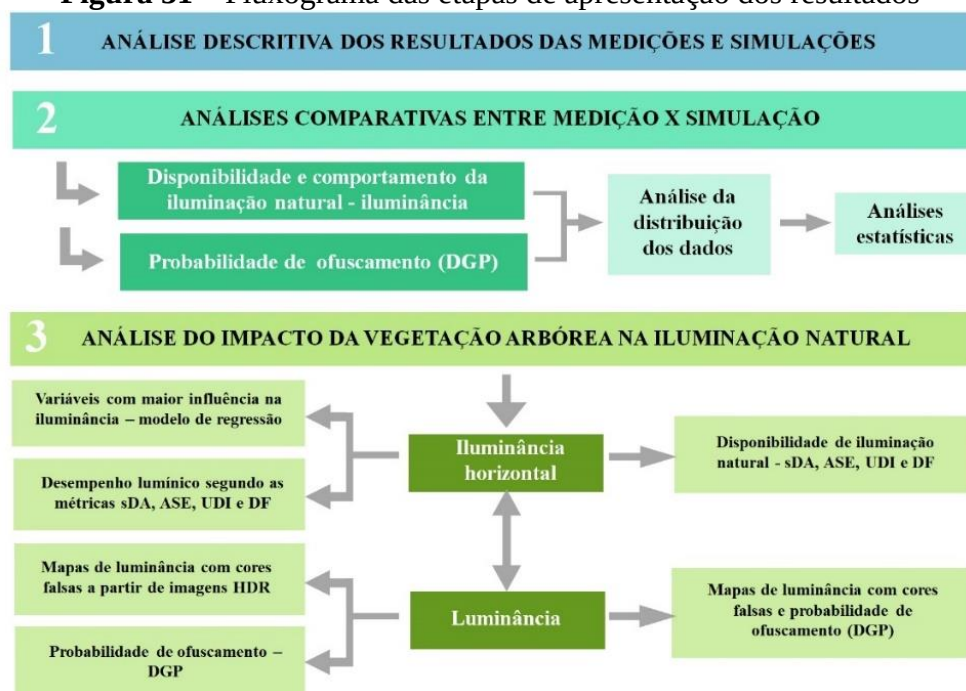
A análise dos resultados está estruturada em três seções principais: análise descritiva dos resultados das medições e simulações, análises comparativas entre medição x simulação e a análise do impacto da vegetação arbórea na iluminação natural. Os resultados serão analisados de acordo com as duas principais variáveis estudadas: iluminância horizontal e mapeamento das luminâncias (Figura 30).

Os resultados da primeira etapa da pesquisa estão descritos em 4.1. Neste item, estão descritas as estimativas de localização, variabilidade e distribuição dos dados obtidos com as medições sob céu real e as simulações computacionais.

No item 4.2, são apresentadas as análises comparativas, buscando validar os resultados das simulações computacionais, verificando em que medida o modelo geométrico virtual da árvore representa adequadamente a árvore real utilizada na etapa da coleta de campo. As análises comparativas são validadas por meio de testes estatísticos executados no *software* RStudio.

A terceira etapa (item 4.3) analisa o impacto da vegetação arbórea na disponibilidade e qualidade da iluminação natural a partir dos dados coletados em campo e os obtidos com as simulações computacionais.

Figura 31 – Fluxograma das etapas de apresentação dos resultados



Fonte: dados da pesquisa, 2023.

4.1 Análise descritiva dos resultados das medições e simulações

Nesta seção, discutem-se as estimativas de localização, variabilidade e exploração da distribuição dos dados obtidos com as medições sob céu real e as simulações computacionais da luz natural.

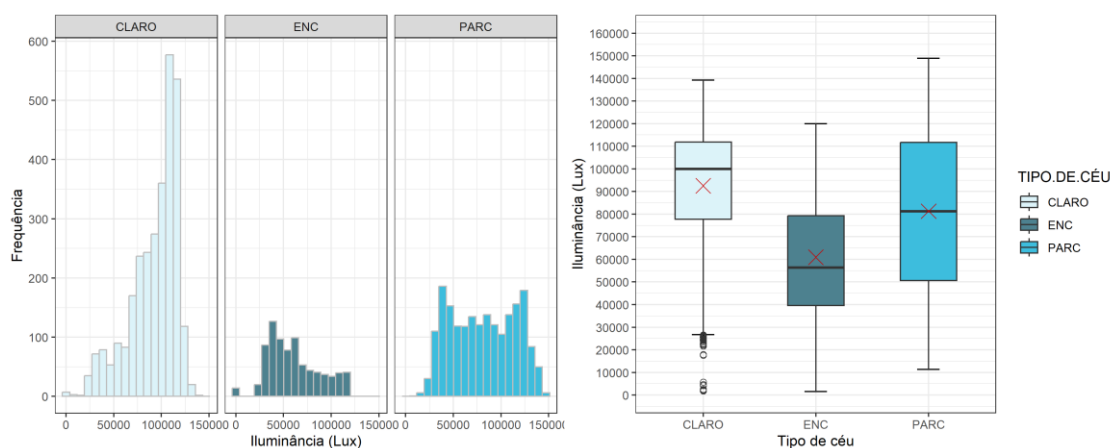
4.1.1 MEDIÇÕES SOB CÉU REAL DA ILUMINÂNCIA HORIZONTAL

Os resultados referentes à iluminância horizontal estabelecem uma relação comparativa entre os cenários considerando a presença da árvore e sem a presença da árvore.

A iluminância externa também foi registrada considerando as condições de céu (Figura 31). De acordo com o boxplot e a Tabela 4, a maior mediana registrada foi a da condição de céu claro, aproximadamente 100.000 lux, seguida da condição parcial e encoberto, 81.290 lux e 56.401,25 lux, respectivamente. A maior variabilidade da luz observada foi para a condição de céu parcial, onde 50% dos registros estão entre 50604 lux e 111660 lux. A condição de céu claro registrou a menor variabilidade da luz, estando 50% da iluminância entre 77776 lux e 111870 lux.

De acordo com o histograma da Figura 31, a maior frequência da iluminância registrada para a condição de céu claro foi entre 100 mil e 120 mil lux. Na condição de céu encoberto, os picos de frequência ocorreram entre 30 mil e 70 mil lux. Já para o céu parcialmente encoberto, observa-se maior uniformidade na distribuição das frequências de iluminância, destacando-se dois picos ocorridos entre 40 mil e 50 mil lux e entre 110 mil e 120 mil lux.

Figura 32 – Distribuição da iluminância medida sob céu real no ambiente externo



Fonte: dados da pesquisa, 2023.

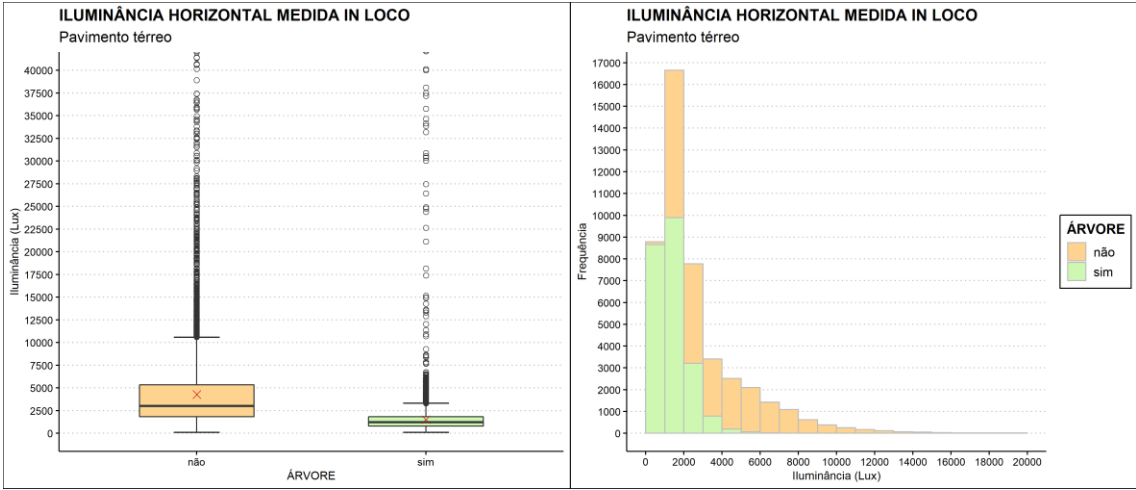
Tabela 5 – Análise exploratória dos dados de iluminância medidos *in loco* no ambiente externo – Estimativas de localização

	ILUMINÂNCIA (lux)		
	CÉU CLARO	CÉU ENCOBERTO	CÉU PARCIAL
Mínimo	1775,1	1564,4	11404
1º quartil	7776	39512	50604
Média	92547,15	60952,16	81285,16
Mediana	99958	56401,25	81290
Média aparada (10%)	95857,57	59138,69	81180,36
Desvio Padrão	24989,06	27007,15	33622,37
3º quartil	111870	79214	111660
Máximo	139250	119940	148880

Fonte: dados da pesquisa, 2023.

Deste ponto em diante, são apresentados os dados amostrais da iluminância interna registrada nos cenários estudados. A Tabela 5 e as Figuras 33 e 34 apresentam as medidas de distribuição, variação e localização dos dados de iluminância por pavimento, considerando a presença ou não da árvore. Para o pavimento térreo, a diferença entre as medianas da condição com árvore e sem árvore é de aproximadamente 1768 lux. Já no pavimento superior, essa diferença é de 449 lux. Os histogramas da frequência de iluminância apontaram distribuição não normal com assimétrica à direita e forte presença de *outliers* nos valores extremo superior. Os picos de iluminância atingidos ocorreram entre 1000 e 2000 lux e 2000 e 3000 lux para os pavimentos térreo e superior, respectivamente.

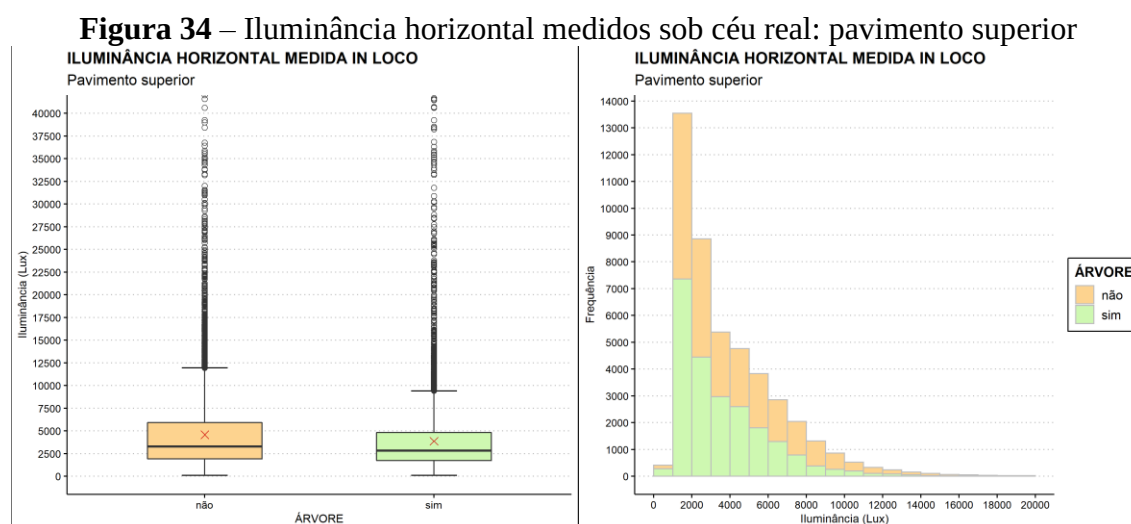
Figura 33 – Iluminância horizontal medida sob céu real: pavimento térreo



Fonte: dados da pesquisa, 2023.

Os boxplots confirmam a presença de valores extremos, concentrados nos valores mais altos. A condição com árvore do pavimento térreo apresentou as menores variações da luz,

como também os menores níveis de iluminâncias atingidos. Neste caso, 75% dos registros estão concentrados abaixo de 1811,65 lux. Considerando a condição sem árvore deste pavimento, 75% dos registros se concentram abaixo de 5342,45 lux. No pavimento superior, 75% da iluminância na condição com árvore está abaixo de 4811,82 lux. E, considerando a condição sem árvore, 75% dos registros estão abaixo de 5928,42 lux.



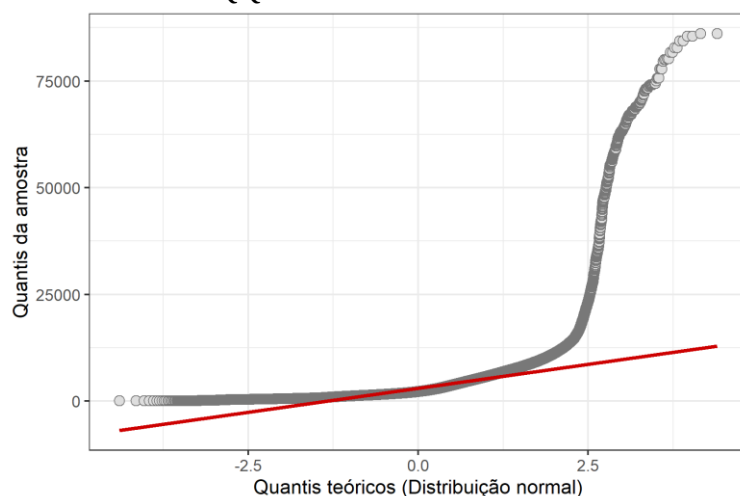
Fonte: dados da pesquisa, 2023.

Tabela 6 – Análise exploratória dos dados de iluminância interna medidos sob céu real – Estimativas de localização e variabilidade.

	ILUMINÂNCIA (lux)			
	PAVIMENTO TÉRREO		PAVIMENTO SUPERIOR	
	Com árvore	Sem árvore	Com árvore	Sem árvore
Mínimo	100,01	100,75	102,1	100,32
1º quartil	805,20	1837,3	1742,1	1921,6
Média	1510,19	4281,55	3874,46	4586,5
Mediana	1231,35	2999,1	2819,25	3268,95
Média aparada (10%)	1311,21	3520,61	3214,46	3844,82
Desvio Padrão	2089,29	5126,91	4629,47	5107,01
3º quartil	1811,65	5342,45	4811,82	5928,42
Máximo	58590	86135	74188	86135

Fonte: dados da pesquisa, 2023.

No gráfico da Figura 35, é possível verificar visualmente a distribuição dos quantis dos dados empíricos com os quantis da distribuição teórica. Observa-se que a maior parte dos pontos não segue perto da linha de distribuição teórica que representa a normalidade dos dados. Desta forma, considera-se que a variável iluminância não sugere uma distribuição normal.

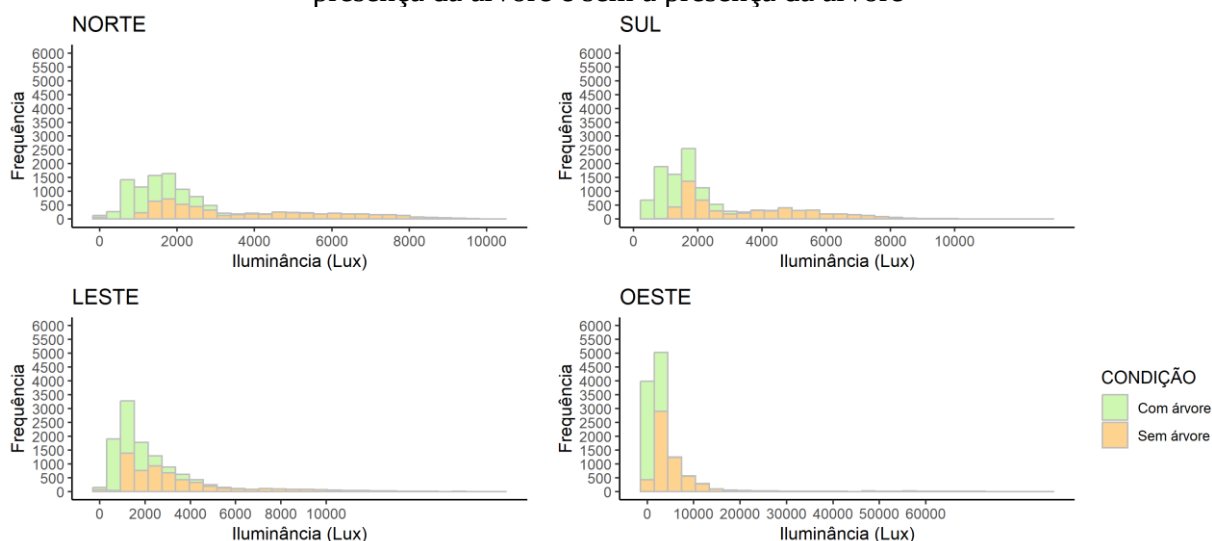
Figura 35 – Gráfico QQ com dados de iluminância medidos *in loco*

Fonte: dados da pesquisa, 2023.

Para melhor avaliação e compreensão do comportamento da luz nos cenários estabelecidos, as análises são apresentadas para cada orientação separadamente. Observa-se, nos histogramas das Figuras 36 e 37, a frequência dos registros de ocorrência da iluminância horizontal medida sob céu real para cada orientação do pavimento térreo e superior, respectivamente.

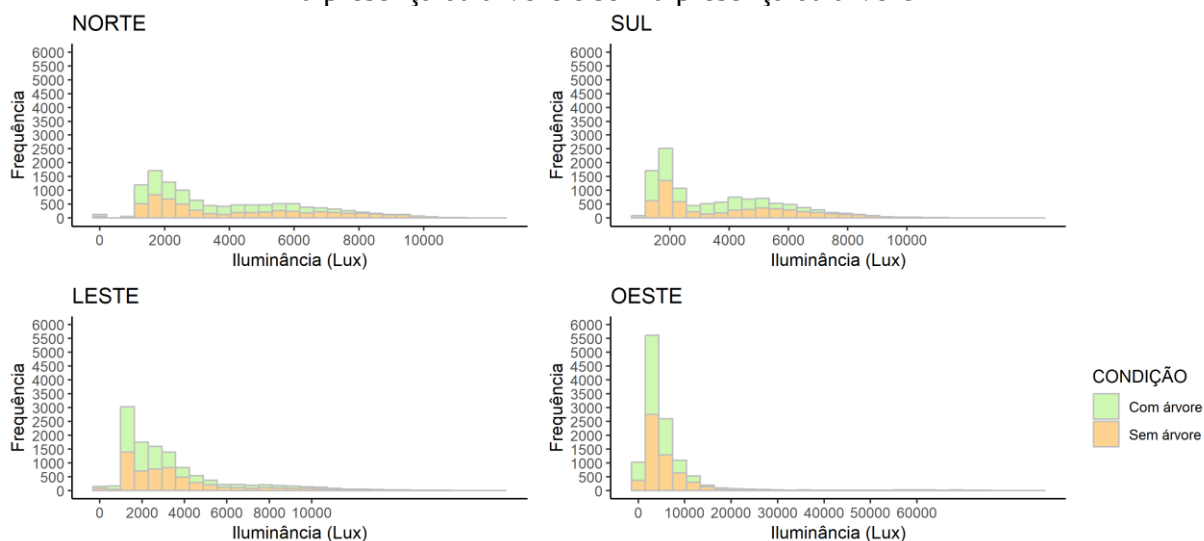
Os dois pavimentos apresentaram comportamentos semelhantes. Nas orientações norte, sul e leste, os picos de frequência atingidos foram na faixa de 1000 a 2000 lux em ambas as condições, com árvore e sem árvore. Na orientação oeste, observam-se frequências de níveis de iluminância mais altos. Para a condição com árvore, as maiores frequências ocorreram até 5000 lux. Para a condição sem árvore, as maiores frequências ocorreram entre 2500 lux até 7500 lux. Em todos os casos, a distribuição dos dados de iluminância sugere uma amostragem não normal com assimétrica à direita e forte presença de *outliers* nos valores extremo superior, especialmente na condição sem a presença da árvore.

Figura 36 – Distribuição da iluminância no pavimento térreo, considerando a situação com a presença da árvore e sem a presença da árvore



Fonte: dados da pesquisa, 2023.

Figura 37 – Distribuição da iluminância no pavimento superior, considerando a situação com a presença da árvore e sem a presença da árvore

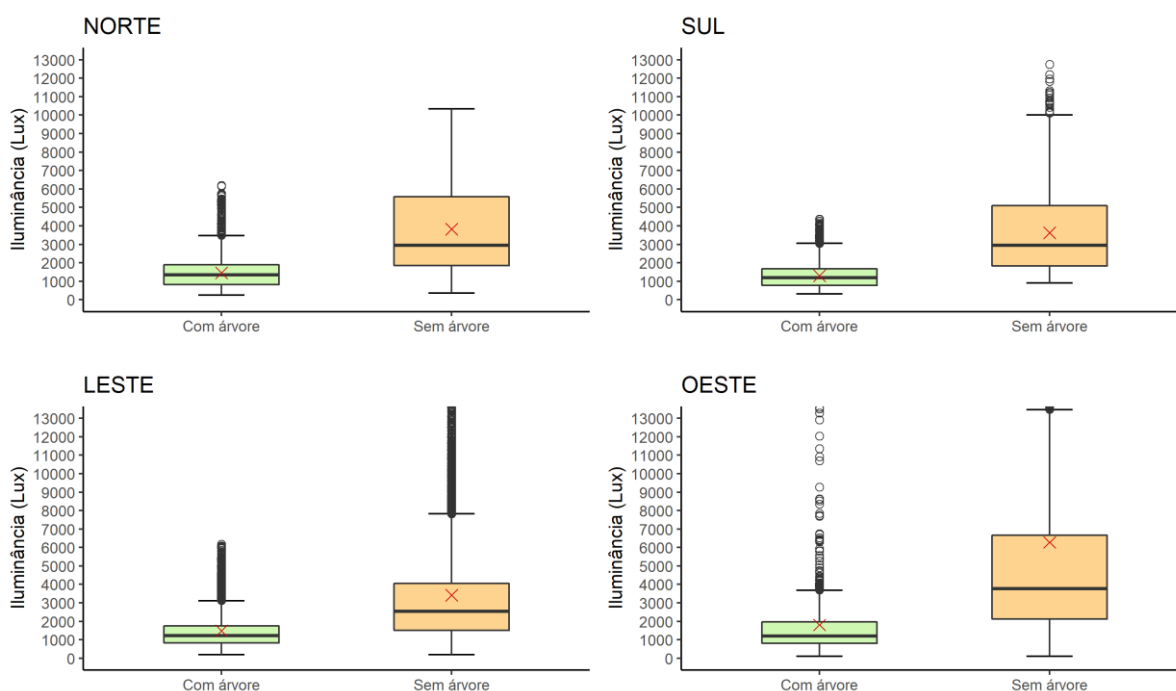


Fonte: dados da pesquisa, 2023.

De acordo com a Figura 38 e a Tabela 6, que apresenta dados do pavimento térreo, observou-se que, neste pavimento, em todas as orientações para a condição com árvore, 75% dos registros encontram-se abaixo de 2000 lux, e a mediana está um pouco acima de 1000 lux. A condição sem árvore apresentou significativa elevação nos níveis de iluminação. Nas orientações norte e sul, 75% dos dados registrados encontram-se abaixo de 6000 lux. Em leste, 75% da iluminância registrada ficou um acima de 4000 lux. A orientação oeste apresentou os

maiores níveis, atingindo aproximadamente 7000 lux. Nas orientações leste e oeste, há significativa presença de valores espúrios na extremidade superior, especialmente na condição sem árvore.

Figura 38 – Pavimento térreo: distribuição da iluminância considerando a situação com a presença da árvore e sem a presença da árvore para as quatro orientações



Fonte: dados da pesquisa, 2023.

Tabela 7 – Iluminância do pavimento térreo sob céu real – Estimativas de localização

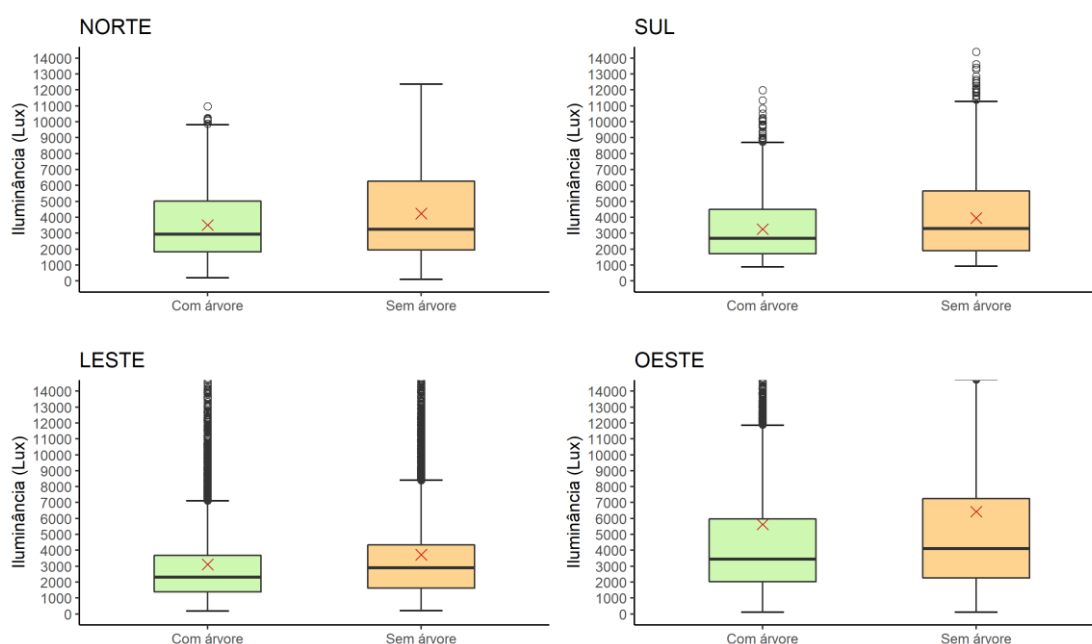
NORTE								
	Mín.	1º Quartil	Mediana	Média	Méd. aparada (10%)	Desvio padrão	3º Quartil	Máx.
Com árvore	248,4	814,950	1338,80	1452,221	1368,65	778,3243	1884,350	6194,8
Sem árvore	366,0	1857,2	2946,45	3817,62	3599,0	2244,39	5573,02	10345,0
SUL								
	Mín.	1º Quartil	Mediana	Média	Média aparada (10%)	Desvio padrão	3º Quartil	Máx.
Com árvore	309,7	768,87	1186,05	1305,06	1230,81	648,85	1681,78	4377,2
Sem árvore	905,4	1819,7	2936,05	3618,54	3380,89	2067,41	5097,52	12763,0
LESTE								
	Mín.	1º Quartil	Mediana	Média	Média aparada (10%)	Desvio padrão	3º Quartil	Máx.

Com árvore	193,6	832,45	1213,25	1481,73	1313,39	922,09	1751,35	6190,80
Sem árvore	193,2	1519,10	2548,0	3415,41	2890,66	2625,55	4045,20	17682,0
OESTE								
	Mín.	1º Quartil	Mediana	Média	Média aparada (10%)	Desvio padrão	3º Quartil	Máx.
Com árvore	100,01	802,22	1199,60	1806,19	1346,62	3947,28	1958,15	58590,0
Sem árvore	100,75	2127,87	3765,75	6281,45	4441,04	9156,88	6661,65	86135,0

Fonte: dados da pesquisa, 2023.

O pavimento superior apresentou diferenças menos significativas entre as condições com árvore e sem árvore. Apesar de os registros na condição sem árvore apresentarem maiores amplitudes, as medianas em ambas as condições são bastante semelhantes (ver Figura 39 e Tabela 7).

Figura 39 – Pavimento superior: distribuição da iluminância medida considerando a situação com a presença da árvore e sem a presença da árvore para as quatro orientações



Fonte: dados da pesquisa, 2023.

Tabela 8 – Iluminância do pavimento superior medida *in loco* – Estimativas de localização

NORTE								
	Mín.	1º Quartil	Mediana	Média	Média aparada (10%)	Desvio padrão	3º Quartil	Máx.
Com	202,8	1821,4	2936,95	3512,73	3315,46	1979,44	5025,17	10963,0

árvore								
Sem árvore	106,0	1945,27	3237,55	4232,21	3972,89	2612,20	6267,35	12360,0
SUL								
	Mín.	1º Quartil	Mediana	Média	Média aparada (10%)	Desvio padrão	3º Quartil	Máx.
Com árvore	871,8	1703,45	2665,45	3254,21	3044,71	1794,92	4506,20	11978,0
Sem árvore	919,20	1892,80	3292,90	3957,44	3694,75	2341,7	5649,57	14383,0
LESTE								
	Mín.	1º Quartil	Mediana	Média	Média aparada (10%)	Desvio padrão	3º Quartil	Máx.
Com árvore	190,0	1399,55	2308,30	3113,67	2636,45	2420,16	3686,27	15914,0
Sem árvore	200,6	1627,07	2893,30	3728,79	3156,86	2899,30	4340,03	18897,0
OESTE								
	Mín.	1º Quartil	Mediana	Média	Média aparada (10%)	Desvio padrão	3º Quartil	Máx.
Com árvore	102,09	2026,30	3438,45	5630,77	4042,55	8303,17	5974,5	74188,0
Sem árvore	100,32	2253,95	4114,30	6434,88	4744,66	8898,25	7243,88	86135,0

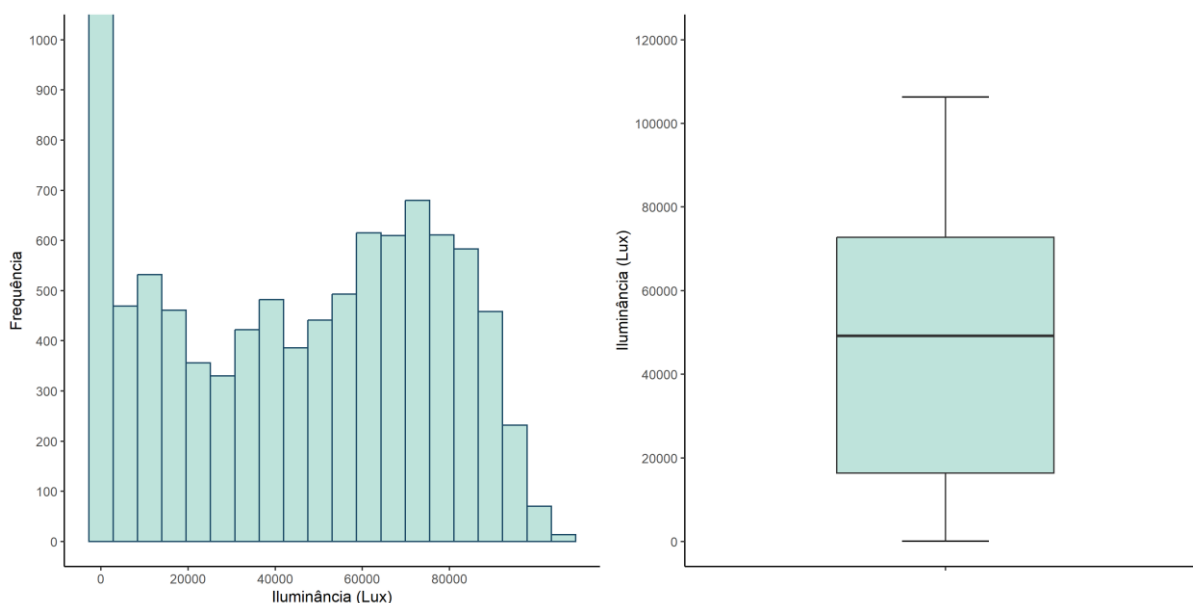
Fonte: dados da pesquisa, 2023.

4.1.2 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

Os resultados da iluminação extraídos das simulações computacionais correspondem ao período de um ano, considerando o intervalo de tempo que vai das 6 horas e 30 minutos às 18 horas e 30 minutos. Assim como a iluminação medida, os resultados da iluminação simulada são apresentados, estabelecendo-se uma relação comparativa entre as situações com e sem a presença da árvore.

A Figura 40 e a Tabela 8 apresentam a distribuição da iluminação registrada no ambiente externo. No histograma, observa-se que a maior frequência da iluminação ocorreu entre 0 e 5 mil lux. Provavelmente, essa faixa corresponde à iluminação dos primeiros horários da manhã e últimos horários da tarde. Outro pico de frequência é observado entre 60 e 80 mil lux.

Nota-se, ainda, que 50% dos registros da iluminação externa está entre 16356 lux e 72783 lux (amplitude interquartil). A média aritmética, mediana e média aparada foram similares, sugerindo que os dados não têm significativa presença de espúrios, circunstância evidenciada no gráfico de caixas.

Figura 40 – Distribuição da iluminância horizontal simulada no ambiente externo

Fonte: dados da pesquisa, 2023.

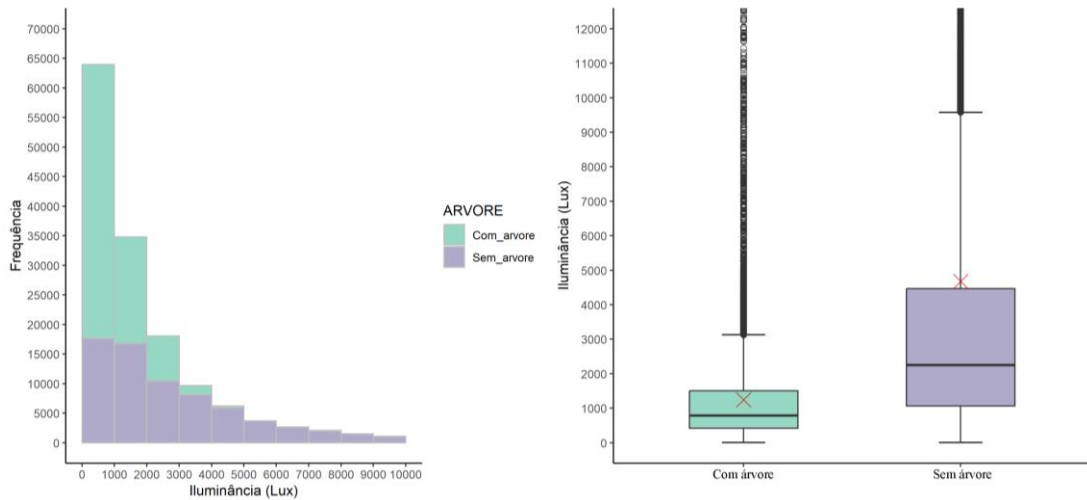
Tabela 9 – Análise exploratória dos dados de iluminância simulada no ambiente externo – Estimativas de localização.

	Iluminância (Lux)
Mínimo	127
1º quartil	16356
Média	46086
Mediana	49159,5
Média aparada (10%)	46102,34
Desvio Padrão	30271,83
3º quartil	72783
Máximo	106312

Fonte: dados da pesquisa, 2023.

As Figuras 41 e 42 e a Tabela 9 apresentam as estimativas de distribuição e o comportamento da iluminância para cada pavimento. Observa-se que, no pavimento térreo com a presença da árvore (Figura 41), a iluminância mais frequente se concentrou entre 0 e 1000 lux, e, sem a presença da árvore, a iluminância se concentrou entre 0 e 2000 lux.

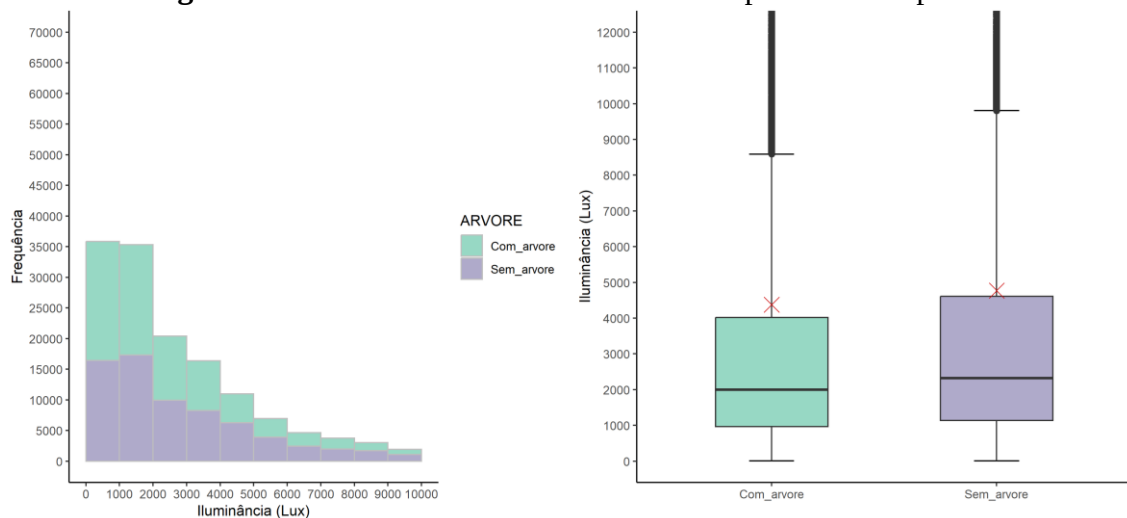
O gráfico de caixas evidencia a diferença de distribuição e a variabilidade entre as situações com e sem árvore. A medianas registradas foram 784 lux e 2246 lux, com árvore e sem árvore, respectivamente. Na condição com árvore, 50% dos registros de iluminância concentraram-se entre 415 e 1502 lux (intervalo interquartil). Na condição sem a presença da árvore, 50% dos registros ficaram entre 1064 e 4496 lux. Observa-se, ainda, a presença de dados extremos (*outliers*) e acentuada assimetria.

Figura 41 – Iluminância horizontal simulada: pavimento térreo

Fonte: dados da pesquisa, 2023.

No pavimento superior (Figura 42), o comportamento da iluminância nas situações com e sem a presença da árvore é bastante similar. A maior frequência dos níveis de iluminância para ambas as situações ocorreu entre 1000 e 2000 lux, conforme evidenciado no histograma. A variabilidade da luz também apresentou significativa similaridade. Com a presença da árvore, 50% da iluminância variou entre 963 e 4014 lux. Sem a presença da árvore, essa variação ficou entre 1140 e 4606 lux.

Nota-se que, neste pavimento, os registros de iluminância da condição com árvore apresentaram uma ligeira redução na amplitude e variabilidade, demonstrando que, nesta situação, a presença do elemento exerce influência pouca significativa.

Figura 42 – Iluminância horizontal simulada: pavimento superior

Fonte: dados da pesquisa, 2023.

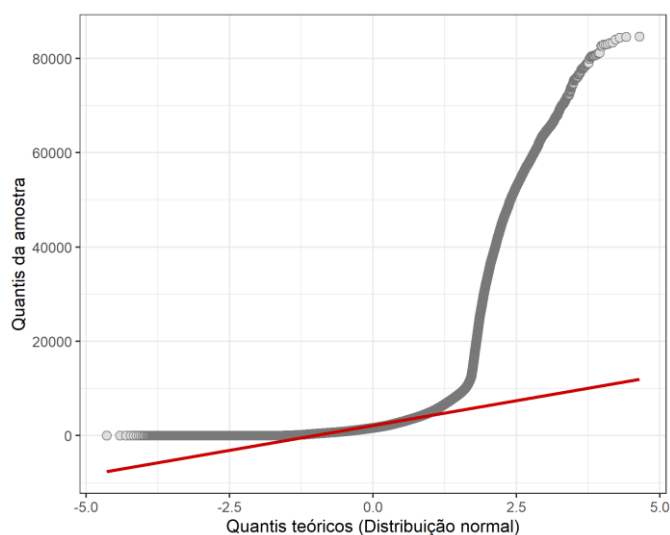
Tabela 10 – Resultados da iluminância horizontal interna simulada– Estimativas de localização e variabilidade

	PAVIMENTO TÉRREO		PAVIMENTO SUPERIOR	
	Com árvore	Sem árvore	Com árvore	Sem árvore
Mínimo	2	5	4	5
1º quartil	415	1064	963	1140
Média	1244,83	4675,87	4377,84	4771,88
Mediana	784	2246	1995	2325
Média aparada (10%)	915,81	2769,94	2492,16	2873,43
Desvio Padrão	2863,19	8783,71	8608,96	9771,63
3º quartil	1502	4496	4014	4606
Máximo	71007	84671	93239	84434

Fonte: dados da pesquisa, 2023.

Assim como ocorreu com a iluminância medida, a iluminância simulada também não apresenta distribuição normal dos seus dados. Isso foi verificado por meio do gráfico QQ da Figura 43, na qual é possível visualizar a distribuição dos quantis dos dados empíricos com os quantis da distribuição teórica. Observa-se que a maior parte dos pontos não seguem próximos à linha de distribuição teórica que representa a normalidade dos dados, não sugerindo uma distribuição normal.

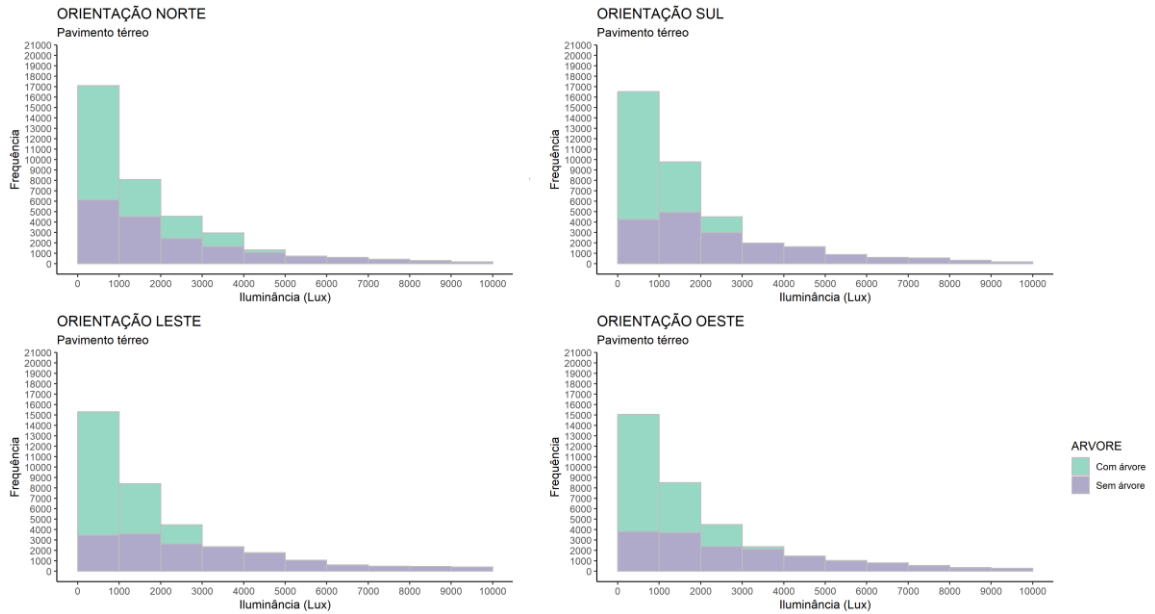
Figura 43 – Gráfico QQ com dados de iluminância horizontal simulada



Fonte: dados da pesquisa, 2023.

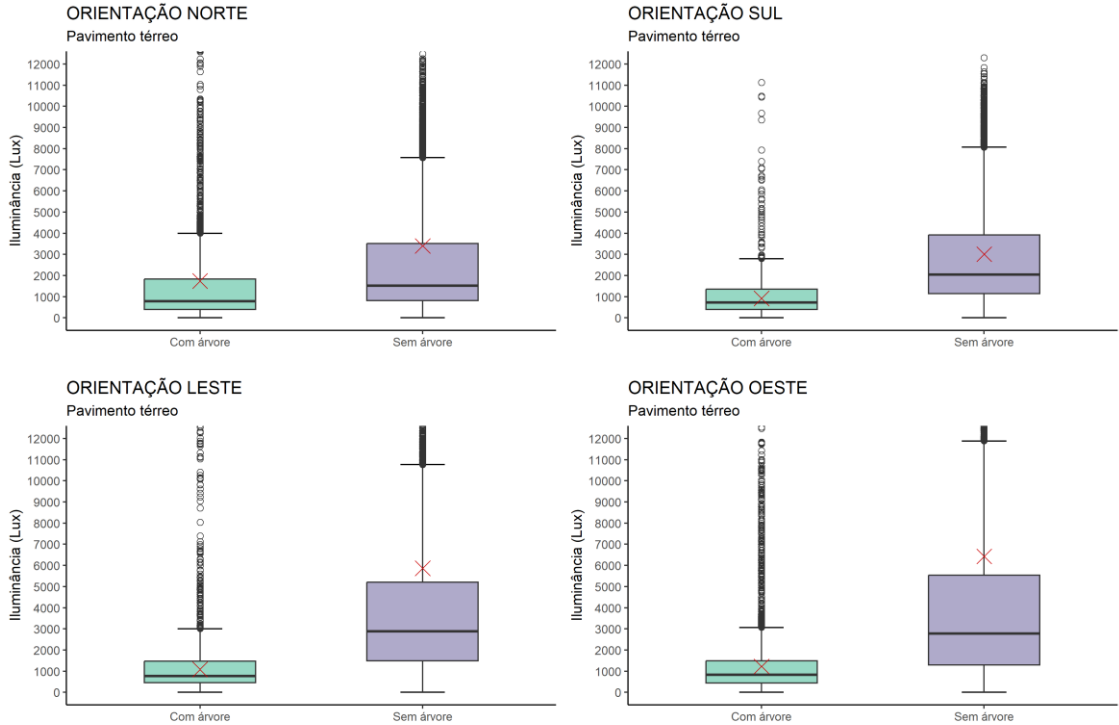
As Figuras 44 a 47 e as Tabelas 10 e 11 apresentam as estimativas de localização, variabilidade e distribuição da iluminância para cada orientação. No pavimento térreo, considerando a presença da árvore, a maior frequência de iluminância ocorreu na faixa de 0 a 1000 lux em todas as orientações (Figura 44). Sem a presença da árvore, observa-se que a frequência se concentra entre 0 e 2000 mil lux.

Figura 44 – Frequência da iluminância simulada para cada orientação – pavimento térreo



Fonte: dados da pesquisa, 2023.

Figura 45 – Pavimento térreo – Distribuição da iluminância simulada considerando a situação com a presença da árvore e sem a presença da árvore para as quatro orientações



Fonte: dados da pesquisa, 2023.

Para todas as orientações do pavimento térreo, observa-se, ainda, que a variabilidade e a amplitude da iluminância da condição com árvore são significativamente menor em relação à condição sem árvore. A condição sem árvore das orientações leste e oeste apresentaram as

maiores amplitudes. As medianas da condição sem árvore ficaram entre 1523,5 e 2878 lux. Já as medianas da condição com árvore, entre 726 e 790 lux. Notam-se diferenças significativas entre as medianas das situações com e sem árvore, especialmente nas orientações leste e oeste (ver Figura 45 e Tabela 11).

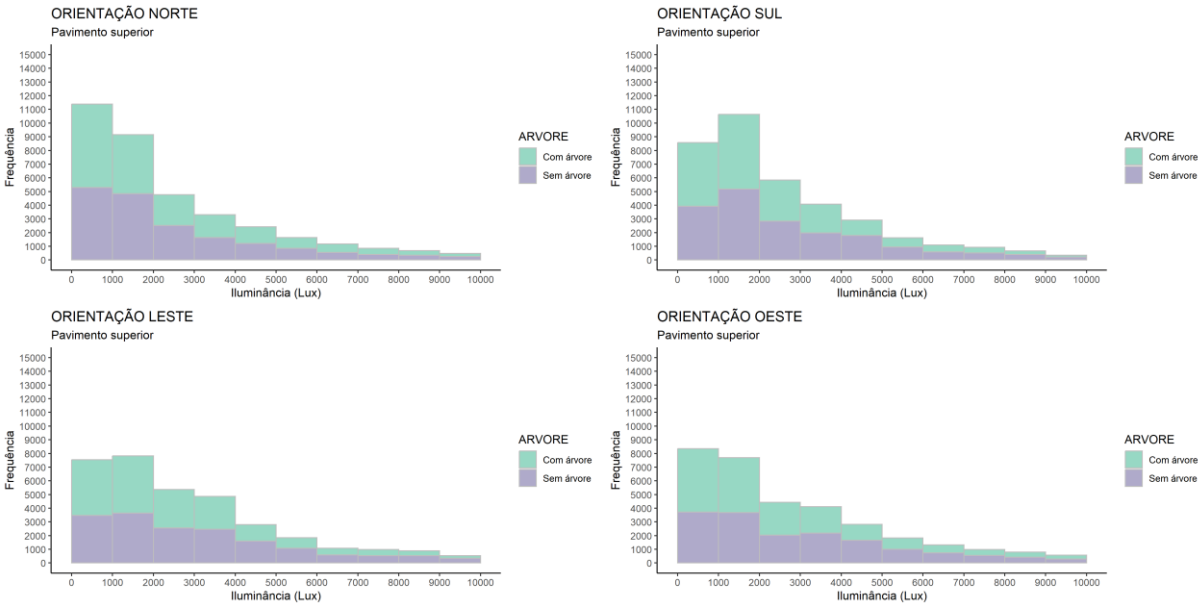
Tabela 11 – Iluminância (lux) simulada do pavimento térreo – Estimativas de localização

NORTE								
	Mín.	1º Quartil	Mediana	Média	Méd. aparada (10%)	Desvio padrão	3º Quartil	Máx.
Com árvore	2	392,8	790	1.744,51	1058	4.515,2	1.836,2	63.618
Sem árvore	5	818	1.523,5	3.400,08	2.094,06	6.891,55	3.520	69.943
SUL								
	Mín.	1º Quartil	Mediana	Média	Média aparada (10%)	Desvio padrão	3º Quartil	Máx.
Com árvore	2	391	726	922	822,95	1.095,12	1.355	38.122
Sem árvore	7	1.139	2.037	3.007	2.429,37	4.024,61	3.911	67.194
LESTE								
	Mín.	1º Quartil	Mediana	Média	Média aparada (10%)	Desvio padrão	3º Quartil	Máx.
Com árvore	2	454	775	1.084	899,89	2.046,36	1.479	53.931
Sem árvore	7	1.492	2.878	5.867	3.393,99	10.020,6	5.206	66.996
OESTE								
	Mín.	1º Quartil	Mediana	Média	Média aparada (10%)	Desvio padrão	3º Quartil	Máx.
Com árvore	2	392,8	790	1.744,5	1.058	4.515,2	1.836,2	63.618
Sem árvore	5	818	1.524	3.400	2.094,06	6.891,55	3.520	69.943

Fonte: dados da pesquisa, 2023.

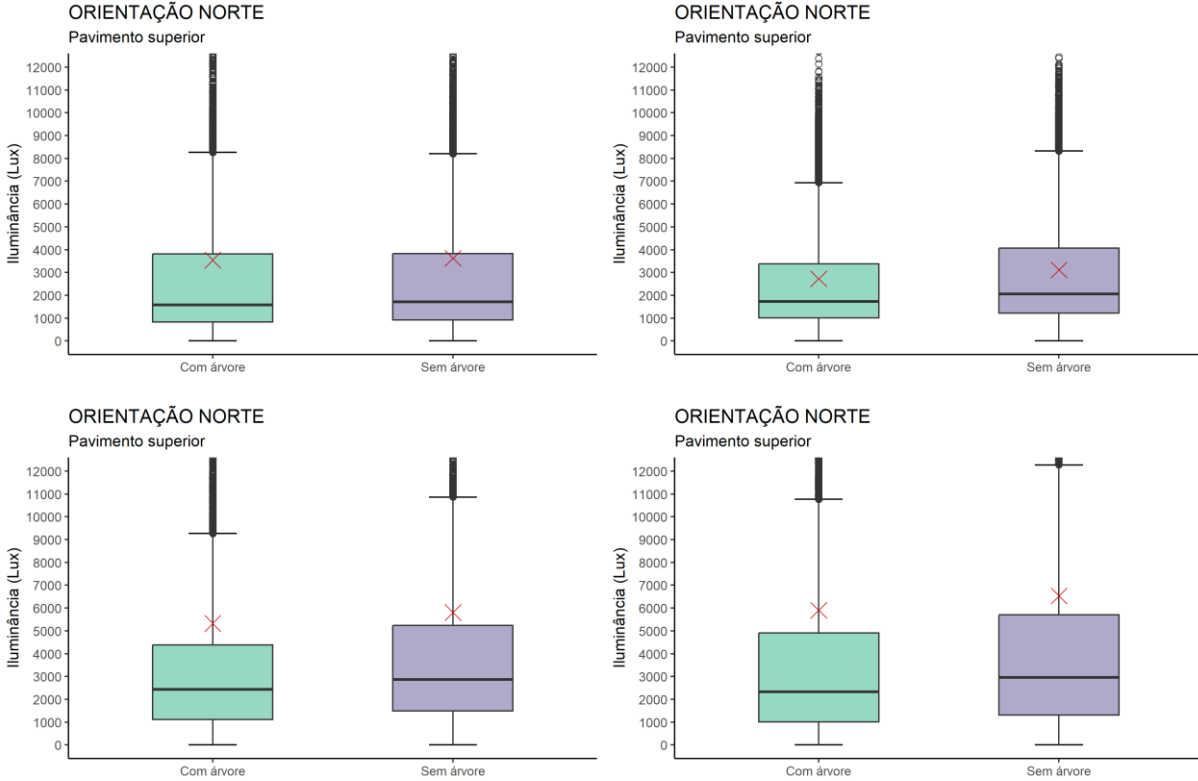
No pavimento superior, a maior frequência da iluminância registrada foi entre 0 e 2000 lux. O comportamento na distribuição foi muito semelhante entre as condições com e sem árvore. As maiores amplitudes e variabilidade da luz ocorreram nas orientações leste e oeste. Na condição com árvore, as medianas ficaram entre 1572 e 2436 lux e entre 1709 e 2959 lux sem a presença da árvore.

Figura 46 – Frequência da iluminância simulada para cada orientação – pavimento superior



Fonte: dados da pesquisa, 2023.

Figura 47 – Pavimento superior – Distribuição da iluminância simulada, considerando a situação com a presença da árvore e sem a presença da árvore para as quatro orientações



Fonte: dados da pesquisa, 2023.

Tabela 12 – Iluminância (lux) simulada do pavimento térreo – Estimativas de localização

NORTE								
	Mín.	1º Quartil	Mediana	Média	Méd. aparada (10%)	Desvio padrão	3º Quartil	Máx.
Com árvore	4	837	1.572	3547	2209,3	6.982,95	3.808	70.411
Sem árvore	5	920	1.709	3.624	2.278,38	7.023,54	3.834	70.231
SUL								
	Mín.	1º Quartil	Mediana	Média	Média aparada (10%)	Desvio padrão	3º Quartil	Máx.
Com árvore	6	1.004	1.730	2.726	2.114,89	3.967,36	3.375	67.456
Sem árvore	7	1.227	2.062	3.118	2.509,46	4.138,92	4.068	68.031
LESTE								
	Mín.	1º Quartil	Mediana	Média	Média aparada (10%)	Desvio padrão	3º Quartil	Máx.
Com árvore	5	1.119	2.436	5.330	2.848,58	9.841,23	4.378	67.558
Sem árvore	6	1.486	2.876	5.807	3.378,53	9.899,21	5.238	67.340
OESTE								
	Mín.	1º Quartil	Mediana	Média	Média aparada (10%)	Desvio padrão	3º Quartil	Máx.
Com árvore	6	1.008	2.328	5.908	3.011,91	11.333,5	4.911	83.239
Sem árvore	6	1.316	2.959	6.539	3.601,64	11.622,2	5.700	84.434

Fonte: dados da pesquisa, 2023.

4.2 Análise comparativa: medição *versus* simulação

Para validar os resultados obtidos com as simulações computacionais e verificar em que medida o modelo 3D virtual da árvore é um representante adequado do modelo arbóreo em escala reduzida utilizado nas medições em campo, apresenta-se, nesta etapa, a análise comparativa entre os dados de medições e simulações da luz natural.

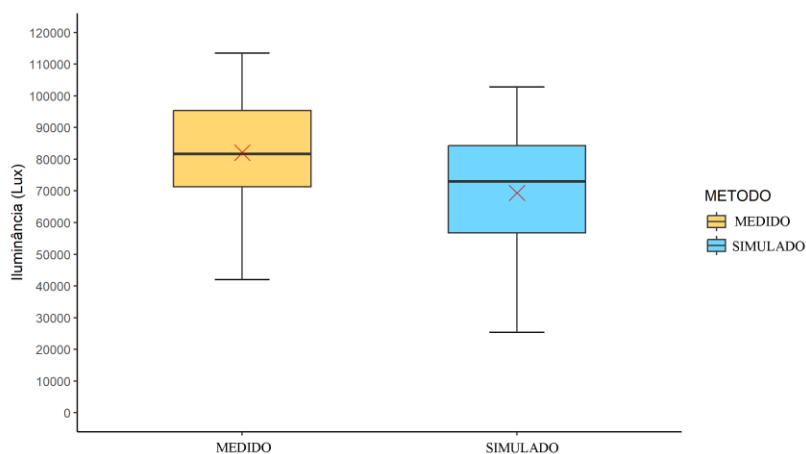
O conjunto de dados das medições da iluminância realizadas em campo e os dados referentes às simulações computacionais de cada cenário foram agrupados em função da orientação, de forma que as variáveis horário e condição de céu não foram consideradas. Os dados referentes ao DGP foram analisados em função da orientação, da condição de céu e horário do dia.

4.2.1 ILUMINÂNCIA HORIZONTAL

Ressalta-se que, para comparar a iluminância simulada com a iluminância medida, tornou-se necessário fazer ajustes nos bancos de dados. Primeiramente, por meio dos valores médios, os registros da iluminância medida passou a ser considerada a cada uma hora, assim como ocorre com o banco de dados extraído das simulações. O horário estabelecido para análise foi das 9 horas e 30 minutos às 15 horas e 30 minutos. Do banco de dados das simulações, foram considerados os dias dos meses de fevereiro e março, que correspondem ao período das medições em campo. E, por último, foram desconsiderados os valores espúrios dos bancos de dados das simulações e das medições.

A Figura 48 e a Tabela 13 apresentam os dados de iluminância externa medidos sob céu real e simulados. A iluminância simulada atingiu menores amplitudes, embora a variabilidade da luz tenha comportamento semelhante em ambas as situações. As medianas das iluminâncias medidas e simuladas são 81652,45 lux e 72980 lux, respectivamente. Logo, a redução relativa da iluminância simulada em relação à medida é de, aproximadamente, 11,9%.

Figura 48 – Iluminância horizontal externa medida e simulada



Fonte: dados da pesquisa, 2023.

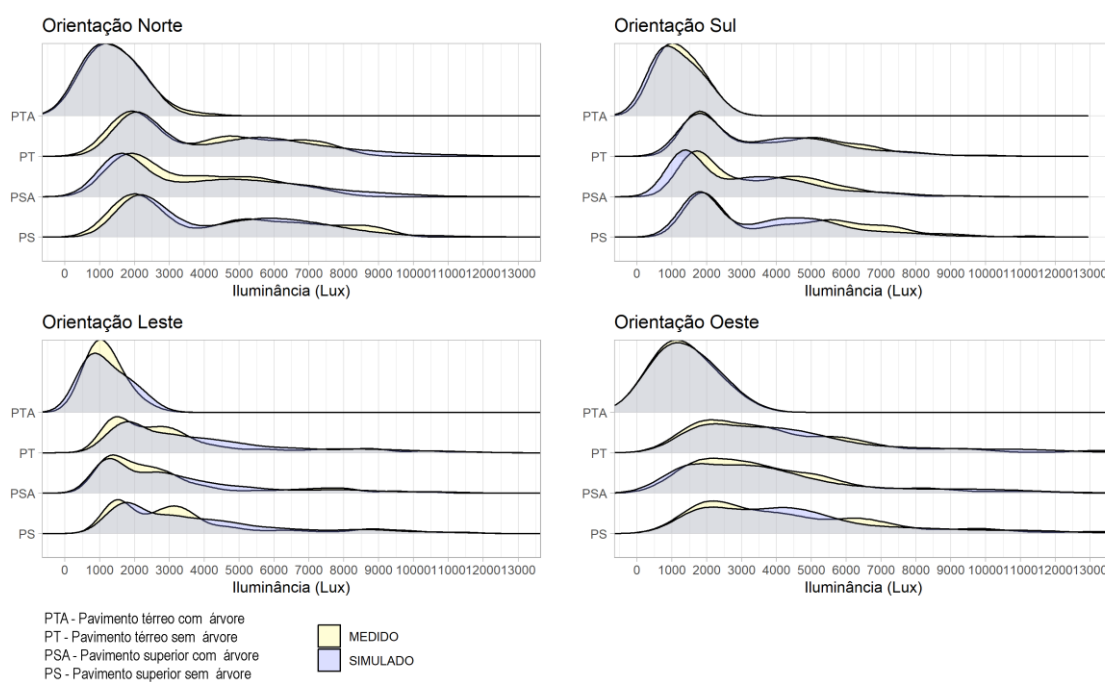
Tabela 13 – Iluminância externa (lux) simulada e medida – Estimativas de localização

	ILUMINÂNCIA HORIZONTAL EXTERNA	
	MEDIÇÃO	SIMULAÇÃO
Min.	42015,87	25356
1º Quartil	71295	56756
Mediana	81652,45	72980
Média	82067,5	69345,53
Média aparada	82681,4	70504,87
Desvio Padrão	17057,32	18270,68
3º Quartil	95415	84294
Máx.	113481,2	102826

Fonte: dados da pesquisa, 2023.

Os gráficos da Figura 49 apresentam, de forma comparativa, a densidade da iluminância medida e simulada, considerando o agrupamento de todos os pontos em cada cenário. Observa-se que a distribuição da iluminância apresenta comportamento semelhante entre simulações e medições. No pavimento térreo com árvore, a maior frequência da iluminância ocorreu entre 500 e 1500 lux. Nos demais cenários, os registros de iluminância mais frequentes ocorreram entre 1500 e 2500 lux.

Figura 49 – Distribuição da densidade da iluminância medida e simulada



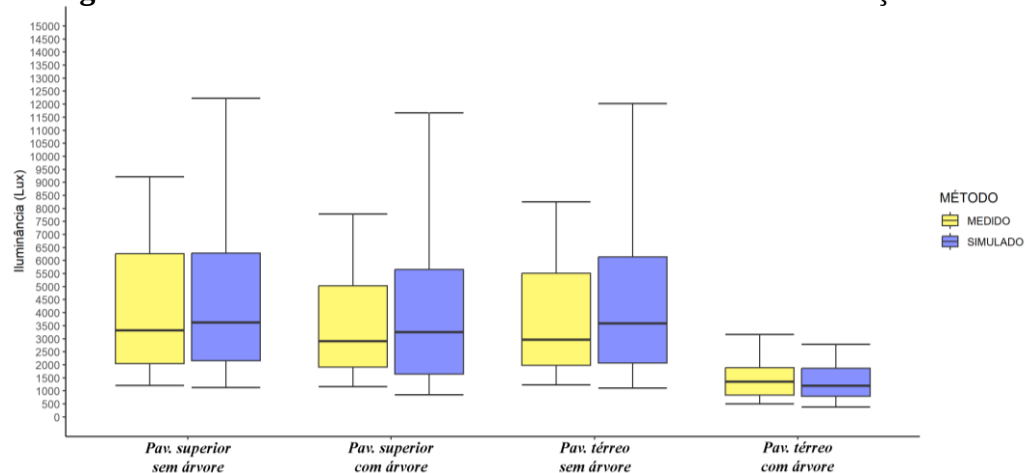
Fonte: dados da pesquisa, 2023.

As Figuras 50 a 53 e as Tabelas 14 a 21 ilustram as medidas de distribuição, variação e localização dos dados de iluminância horizontal medidos e simulados. A partir de uma análise visual comparativa dos gráficos de cada orientação, fica evidenciado que os conjuntos dos dados medidos e simulados mostram obedecer a uma mesma tendência em todos os quatro cenários.

Considerando que foram rejeitados os pressupostos da distribuição normal dos conjuntos de dados (teste de Shapiro-Wilk), o teste não paramétrico de Mann-Whitney foi aplicado, a fim de verificar chances de semelhanças ou diferenças entre o comportamento dos dados medidos e simulados (amostras independentes), estimando margens de erro com limites superior e inferior a 5% do valor esperado (intervalos de confiança de 95%). O tamanho do efeito foi verificado segundo o método de linguagem comum, conforme descreve Kerby (2014). Os resultados para cada orientação são apresentados nas tabelas 14, 16, 18 e 20.

Na orientação norte, nota-se que a iluminância simulada apresenta maior amplitude, exceto no caso do pavimento térreo com árvore, que foi ligeiramente menor. As diferenças dos intervalos interquartis e as medianas medidas e simuladas apresentaram diferenças pouco significativas. O melhor ajuste ocorreu para o pavimento térreo com árvore, onde a diferença interquartil medida foi 1057,8 lux, e a simulada foi igual a 1077 lux, sendo de 154,26 lux a diferença entre as medianas.

Figura 50 – Iluminância horizontal medida e simulada – orientação norte



Fonte: dados da pesquisa, 2023.

Tabela 14 – Iluminância horizontal medida e simulada para a orientação norte – Estimativas de localização

	ORIENTAÇÃO NORTE							
	Pavimento térreo				Pavimento superior			
	Com árvore		Sem árvore		Com árvore		Sem árvore	
	M	S	M	S	M	S	M	S
Min.	500,68	381,0	1232,11	1102,0	1155,04	846,0	1199,93	1129,0
1º Quartil	834,4	790,0	1971,0	2068,0	1915,0	1641,0	2039,0	2156,0
Mediana	1346,76	1192,5	2962,72	3587,0	2902,845	3250,500	3317,85	3617,0
Média	1441,6	1343,08	3794,36	4791,26	3514,06	4310,93	4218,15	4842,26
Média aparada	1363,52	1305,78	3628,58	4055,7	3349,06	3591,31	4005,26	4161,77
Desvio Padrão	711,63	605,34	2116,56	4589,19	1869,51	4541,13	2495,66	4503,66
3º Quartil	1892,2	1867,0	5513,0	6140,0	5031,0	5653,0	6263,0	6286,0
Máx.	4059,9	2786,0	8253,65	44892,0	7782,24	43656,0	9213,84	44024,0

*M = medição; S = simulação

Fonte: dados da pesquisa, 2023.

A Tabela 15 apresenta os resultados do teste de hipótese, considerando a orientação norte. O teste de Mann-Whitney aceitou a hipótese nula, demonstrando que as medianas e/ou distribuições da iluminância simulada e medida não possuem diferenças estatisticamente significativas (valor-p > 0,05) para o pavimento térreo com árvore (w = 89626; p-valor = 0.2939), como também para o pavimento superior com árvore (w = 89292; p-valor = 0.8137) e

sem a presença da árvore ($w = 83768$; $p\text{-valor} = 0,1877$). No pavimento térreo sem árvore, a hipótese nula foi rejeitada, aceitando a hipótese alternativa de que há diferença significativa entre as medianas e/ou distribuições ($w = 79040$; $p\text{-valor} = 0.02488$).

Segundo os resultados para o tamanho do efeito, no pavimento térreo com árvore, a probabilidade da iluminância medida ser maior que a iluminância simulada é de 53,1%. Nos demais cenários, as probabilidades são maiores para a iluminância simulada. Nota-se que, apesar de o valor p no pavimento térreo sem árvore ser menor que 0,05, a probabilidade da iluminância simulada ser maior que a medida é relativamente baixa.

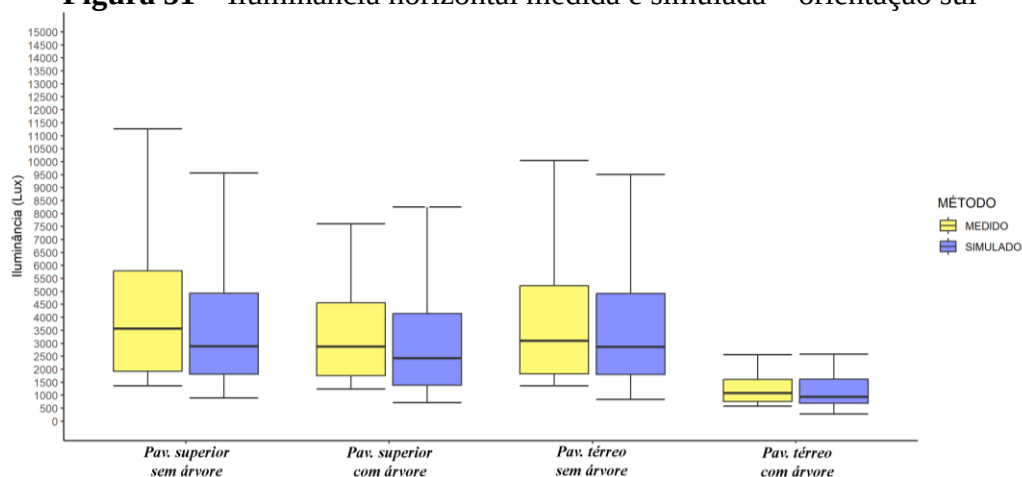
Tabela 15 – Resultados do teste de Mann-Whitney para a orientação norte

Pavimento	Condição	Método	NORTE		Valor p	Tamanho do efeito
			Amplitude interquartil	Estatística do teste		
Pav. térreo	Com árvore	Medição	1057,78	89626	0.2939	53,1%
		Simulação	1077			
	Sem árvore	Medição	3541.415	79040	0.02488	56,3%
		Simulação	4072.250			
Pav. superior	Com árvore	Medição	3115,8	89292	0.8137	50,7%
		Simulação	4012,0			
	Sem árvore	Medição	4223.775	83768	0.1877	53,7%
		Simulação	4129,5			

Fonte: dados da pesquisa, 2023.

Na orientação sul, a iluminância medida apresentou maior amplitude e variação nos pavimentos térreo e superior sem árvore. Observam-se poucas diferenças entre os intervalos interquartis, tendo ocorrido o melhor ajuste para os cenários com a presença da árvore. As diferenças entre as medianas também podem ser consideradas baixas, a maior proximidade ocorreu para o pavimento térreo com a presença da árvore, com diferença de 149,42 lux (ver Figura 51 e Tabela 16).

Figura 51 – Iluminância horizontal medida e simulada – orientação sul



Fonte: dados da pesquisa, 2023.

Tabela 16 – Iluminância medida e simulada para a orientação sul – Estimativas de localização

	ORIENTAÇÃO SUL							
	Pavimento térreo				Pavimento superior			
	Com árvore		Sem árvore		Com árvore		Sem árvore	
	M	S	M	S	M	S	M	S
Min.	577,76	279,0	1359,74	836,0	1234,78	718,0	1361,85	892,0
1º Quartil	760,0	691,0	1818,0	1801,0	1751,0	1388,0	1926,0	1810,0
Mediana	1082,42	933,0	3090,801	2865,0	2867,292	2427,0	3568,04	2886,0
Média	1229,19	1162,94	3634,35	3479,87	3269,87	2970,08	3996,81	3505,67
Média aparada	1186,75	1121,61	3412,54	3250,68	3071,44	2711,91	3749,83	3261,97
Desvio Padrão	526,52	567,2	2048,23	1985,9	1782,03	1882,42	2349,41	2014,86
3º Quartil	1612,9	1618,0	5222,0	4922,0	4561,0	4148,0	5790,0	4933,0
Máx.	2557,3	2581,0	10042,33	11085,0	9209,84	10339,0	11268,74	11555,0

*M = medição; S = simulação

Fonte: dados da pesquisa, 2023.

Os resultados do teste Mann-Whitney para a orientação sul (Tabela 17) mostraram que a hipótese nula foi aceita nos cenários do pavimento térreo, demonstrando que as medianas e/ou distribuições da iluminância simulada e medida não possuem diferenças estatisticamente significativas. A hipótese nula foi rejeitada nos cenários do pavimento superior, aceitando a hipótese alternativa de que há diferença significativa entre a iluminância medida e simulada.

Com relação aos tamanhos do efeito, o pavimento térreo com árvore apresenta 54,6% de probabilidade de a iluminância medida ser maior que a simulada. No cenário sem árvore deste pavimento, essa probabilidade é de 52,2%. O pavimento superior com e sem árvore, apresentaram valor p menor que 0,05. No entanto, as probabilidades de a iluminância medida ser maior que a iluminância simulada podem ser consideradas baixas, com 58,4% e 56,2%, para o cenário com árvore e sem árvore, respectivamente.

Tabela 17 – Resultados do teste de Mann-Whitney para a orientação sul

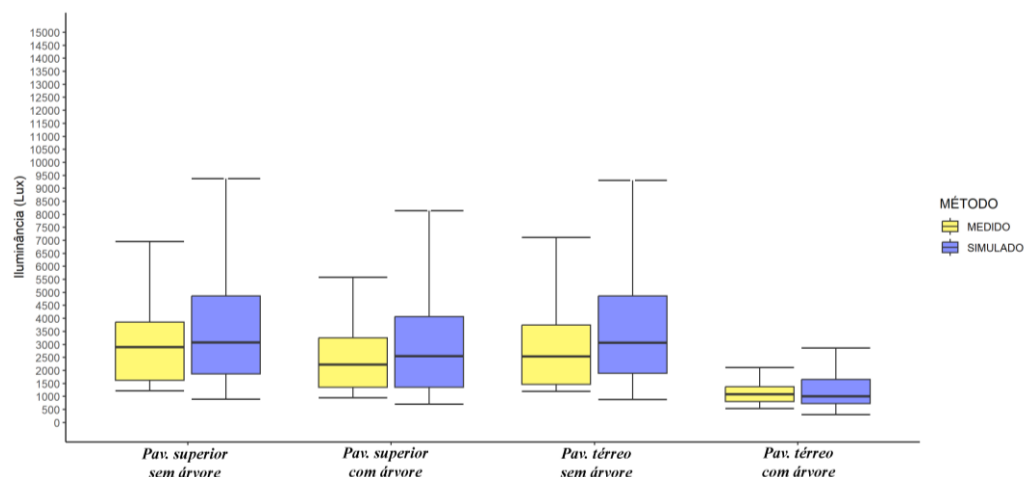
SUL						
Pavimento	Condição	Método	Amplitude interquartil	Estatística do teste	Valor p	Tamanho do efeito
Pav. térreo	Com árvore	Medição	852.937	88033	0.1249	54.6%
		Simulação	927,0			
	Sem árvore	Medição	3403.963	94539	0.4286	52.2%
		Simulação	3120,75			
Pav. superior	Com árvore	Medição	2809.627	100074	0.02862	56.2%
		Simulação	2759,75			
	Sem árvore	Medição	3864.289	106142	0.002186	58.6%
		Simulação	3122,5			

Fonte: dados da pesquisa, 2023.

Na orientação leste (Figura 52 e Tabela 18), as maiores amplitudes e variação da iluminância ocorreram para o conjunto de dados simulados. Nesta orientação, as diferenças entre os intervalos interquartis são mais acentuadas. A maior diferença entre as medianas dos

dados medidos e simulados ocorreu no pavimento térreo sem a presença da árvore (531,45 lux), e o melhor ajuste foi no mesmo pavimento com a presença da árvore (81 lux).

Figura 52 – Iluminância horizontal medida e simulada – orientação leste



Fonte: dados da pesquisa, 2023.

Tabela 18 – Iluminância medida e simulada para a orientação leste – Estimativas de localização

	ORIENTAÇÃO LESTE							
	Pavimento térreo				Pavimento superior			
	Com árvore		Sem árvore		Com árvore		Sem árvore	
	M	S	M	S	M	S	M	S
Min.	537,43	298,0	1195,17	882,0	951,03	696,0	1216,5	891,0
1º Quartil	798,1	720,2	1467,0	1884,0	1352,0	1348,0	1617,0	1860,0
Mediana	1084	1003	2532,5	3064,0	2225,93	2546,0	2896,417	3074,0
Média	1165,8	1194,8	3311,13	3784,05	2986,26	3172,66	3523,95	3772,56
Média aparada	1111,6	1147,47	2857,0	3398,34	2553,6	2758,82	3070,94	3397,14
Desvio Padrão	448,92	595,53	2391,9	2440,79	2247,84	2332,54	2471,89	2422,62
3º Quartil	1373,8	1656,8	3747,0	4861,0	3257,0	4072,0	3852,0	4866,0
Máx.	2553,0	2865,0	11631,51	12339,0	10476,17	11854,0	11546,4	12523
*M = medição; S = simulação								

Fonte: dados da pesquisa, 2023.

Para a orientação leste (Tabela 19), a hipótese de que existem diferenças estatisticamente significativas (hipótese alternativa) foi aceita para o cenário sem árvore do pavimento térreo ($W = 71753$; $p = 0.006625$). Nos demais cenários, a hipótese nula foi aceita. Ou seja: não existem diferenças significativas entre a iluminância simulada e medida.

Os resultados do tamanho do efeito mostraram que, no pavimento térreo sem árvore, apesar de o teste estatístico mostrar que existe diferença significativa entre as duas amostras de dados (medido e simulado), a probabilidade de a iluminância simulada ser maior do que a iluminância medida é de apenas 57,8%. No pavimento térreo com árvore, essa probabilidade é

de 51,8%. No pavimento superior com e sem a presença da árvore, as probabilidades são de 52,2% e 54,8%, respectivamente.

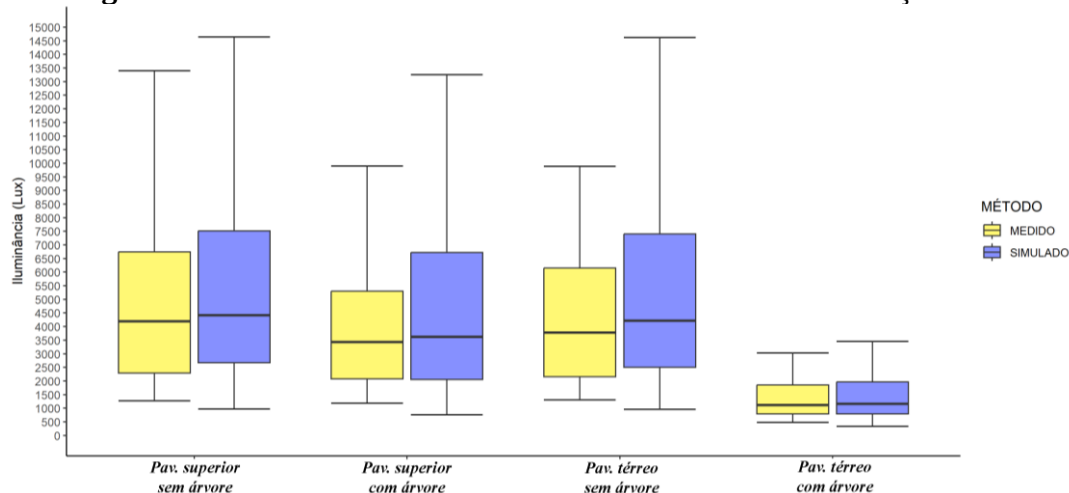
Tabela 19 – Resultados do teste de Mann-Whitney para a orientação leste

LESTE						
Pavimento	Condição	Método	Amplitude interquartil	Estatística do teste (W)	Valor p	Tamanho do efeito
Pav. térreo	Com árvore	Medição	575,724	73178	0.5686	51,8%
		Simulação	936,5			
	Sem árvore	Medição	2279,78	71753	0.006625	57,8%
		Simulação	2977,5			
Pav. superior	Com árvore	Medição	1905,018	77793	0.4565	52,2%
		Simulação	2723,75			
	Sem árvore	Medição	2235,08	76980	0.09686	54,8%
		Simulação	3005,0			

Fonte: dados da pesquisa, 2023.

As maiores amplitudes e variação da iluminância ocorreram na orientação oeste (Figura 53 e Tabela 20). Em todos os cenários, os registros simulados apresentaram diferenças mais acentuadas nos intervalos interquartis. No entanto, as diferenças entre as medianas dos dados medidos e simulados podem ser consideradas moderadas, sendo a menor diferença no pavimento térreo com a presença da árvore (51 lux) e a maior no pavimento térreo sem árvore (429,5 lux).

Figura 53 – Iluminância horizontal medida e simulada – orientação oeste



Fonte: dados da pesquisa, 2023.

Tabela 20 – Iluminância medida e simulada para a orientação oeste – Estimativas de localização

ORIENTAÇÃO OESTE								
	Pavimento térreo				Pavimento superior			
	Com árvore		Sem árvore		Com árvore		Sem árvore	
	M	S	M	S	M	S	M	S
Min.	481,6	335,0	1302,2	956,0	1186,2	753,0	1273,9	967,0
1º Quartil	794,5	792,0	2160,0	2506,0	2080,0	2052,0	2291,0	2666,0
Mediana	1109,9	1160,0	3782,5	4212,0	3433,3	3619,5	4187,2	4416,0
Média	1356,5	1390,8	6628,5	9078,6	5508,9	8470,2	6877,3	9217,6
Média aparada	1288,7	1330,6	4623,9	5558,4	3956,7	4989,5	4877,9	5704,8
Desvio Padrão	664,4	683,3	8083,1	12993,2	6565,9	12763,7	8401,2	13021,
3º Quartil	1851,7	1966,0	6155,0	7398,0	5304,0	6721,0	6742,0	7516,0
Máx.	3033,9	3453,0	44708,1	63292,0	42625,5	62049,0	50943,5	63791

*M = medição; S = simulação

Fonte: dados da pesquisa, 2023.

A Tabela 21 apresenta os resultados do teste de hipótese de Mann-Whitney para a orientação oeste. Para todos os cenários, foi aceita a hipótese de que não existem diferenças significativas entre os conjuntos de dados. Nesta orientação, assim como nas demais, o tamanho do efeito é considerado relativamente pequeno em todos os casos. O maior efeito observado foi no pavimento térreo sem árvore, onde a probabilidade de a iluminância simulada ser maior que a iluminância medida é de 53,7%.

Tabela 21 – Resultados do teste de Mann-Whitney para a orientação oeste

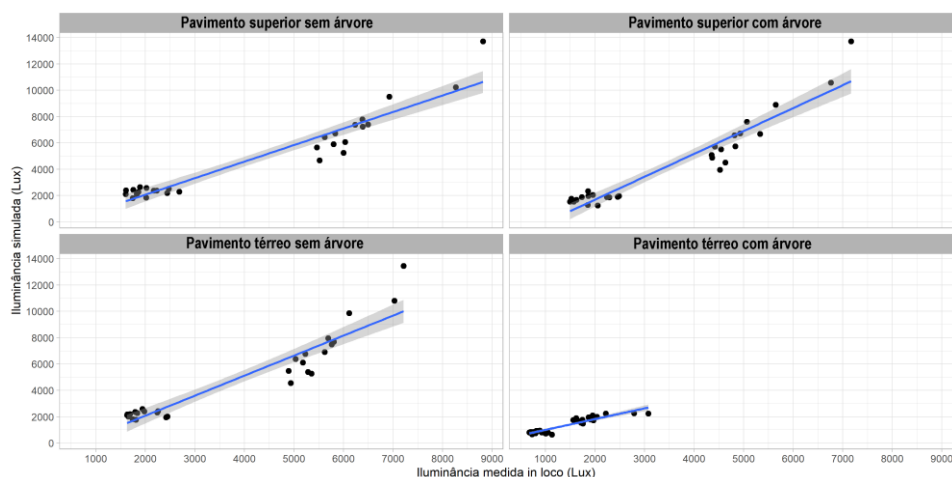
OESTE						
Pavimento	Condição	Método	Amplitude interquartil	Estatística do teste	Valor p	Tamanho do efeito
Pav. térreo	Com árvore	Medição	1057,13	82561	0.8186	50.67304
		Simulação	1174,0			
	Sem árvore	Medição	3994,8	83752	0.1867	53.7%
		Simulação	4892,75			
Pav. superior	Com árvore	Medição	3224,6	84785	0.5915	51.54035
		Simulação	4669,0			
	Sem árvore	Medição	4451,12	85939	0.3722	52.51779
		Simulação	4849,25			

Fonte: dados da pesquisa, 2023.

A correlação entre a média horária da iluminância medida e simulada também foi analisada por meio do coeficiente de Spearman (ρ). Foi adotado $\rho < 0,5$ (correlação fraca), $> 0,7$ (moderada), $> 0,9$ (forte). Os resultados mostram que a hipótese nula foi rejeitada, aceitando a hipótese alternativa de que as correlações são diferentes de zero ($p < 0,05$) em todos os cenários. Os resultados ainda sugerem uma relação linear e ascendente, demonstrando que, ao passo que a iluminância medida aumenta, também aumenta a iluminância simulada (ver Figuras 54 a 57 e Tabelas 22 e 23).

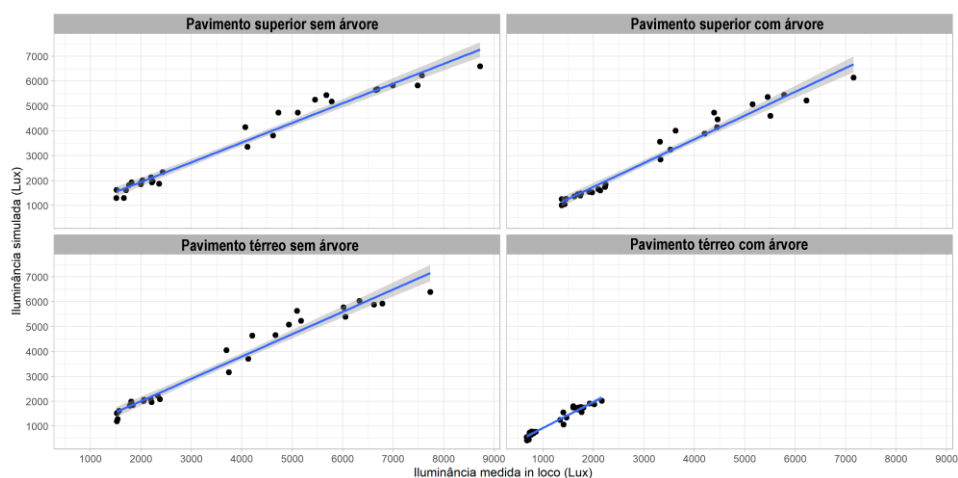
As correlações para orientação norte são consideradas moderadas no pavimento térreo com e sem árvore e no pavimento superior sem árvore. O pavimento superior com árvore apresentou forte correlação entre a iluminância medida e simulada. Todos os demais cenários apresentam correlações fortes nas orientações sul, leste e oeste.

Figura 54 – Correlação entre a iluminância medida e simulada para a orientação norte



Fonte: dados da pesquisa, 2023.

Figura 55 – Correlação entre a iluminância medida e simulada para a orientação sul



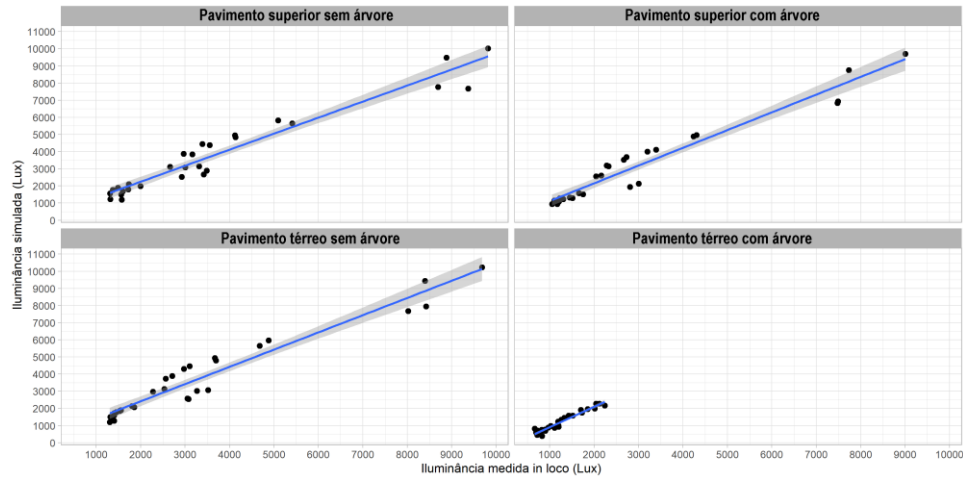
Fonte: dados da pesquisa, 2023.

Tabela 22 – Resultados da correlação de Spearman para as orientações norte e sul

		NORTE			SUL		
	Condição	Estatística do teste (S)	Valor p	Coef. de correlação (Rho)	Estatística do teste	Valor p	Coef. de correlação (Rho)
Pav. térreo	Com árvore	728	<0,001	0,8007663	188	<0,001	0.9485495
	Sem árvore	436	<0,001	0,8806787	72	<0,001	0.9802956
Pav. superior	Com árvore	308	<0,001	0.9157088	50	<0,001	0.9863164
	Sem árvore	388	<0,001	0.893815	90	<0,001	0.9753695

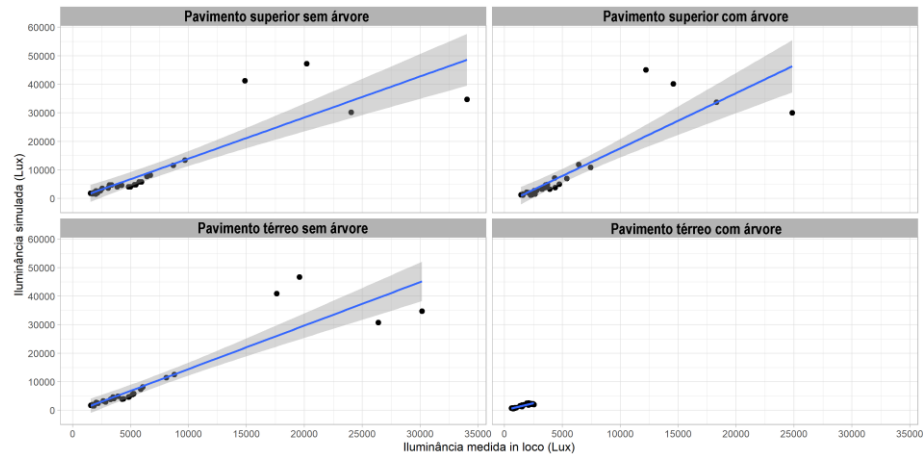
Fonte: dados da pesquisa, 2023. ρ

Figura 56 – Correlação entre a iluminância medida e simulada para a orientação leste



Fonte: dados da pesquisa, 2023.

Figura 57 – Correlação entre a iluminância medida e simulada para a orientação oeste



Fonte: dados da pesquisa, 2023.

Tabela 23 – Resultados da correlação de Spearman para as orientações leste e oeste

		LESTE			OESTE		
Condição		Estatística do teste	Valor p	Coef. de correlação (Rho)	Estatística do teste	Valor p	Coef. de correlação (Rho)
Pav. térreo	Com árvore	204	<0,001	0.9441708	298	<0,001	0.9184455
	Sem árvore	192	<0,001	0.9474548	106	<0,001	0.9709907
Pav. superior	Com árvore	114	<0,001	0.9610256	216	<0,001	0.9408867
	Sem árvore	208	<0,001	0.9430761	110	<0,001	0.969896

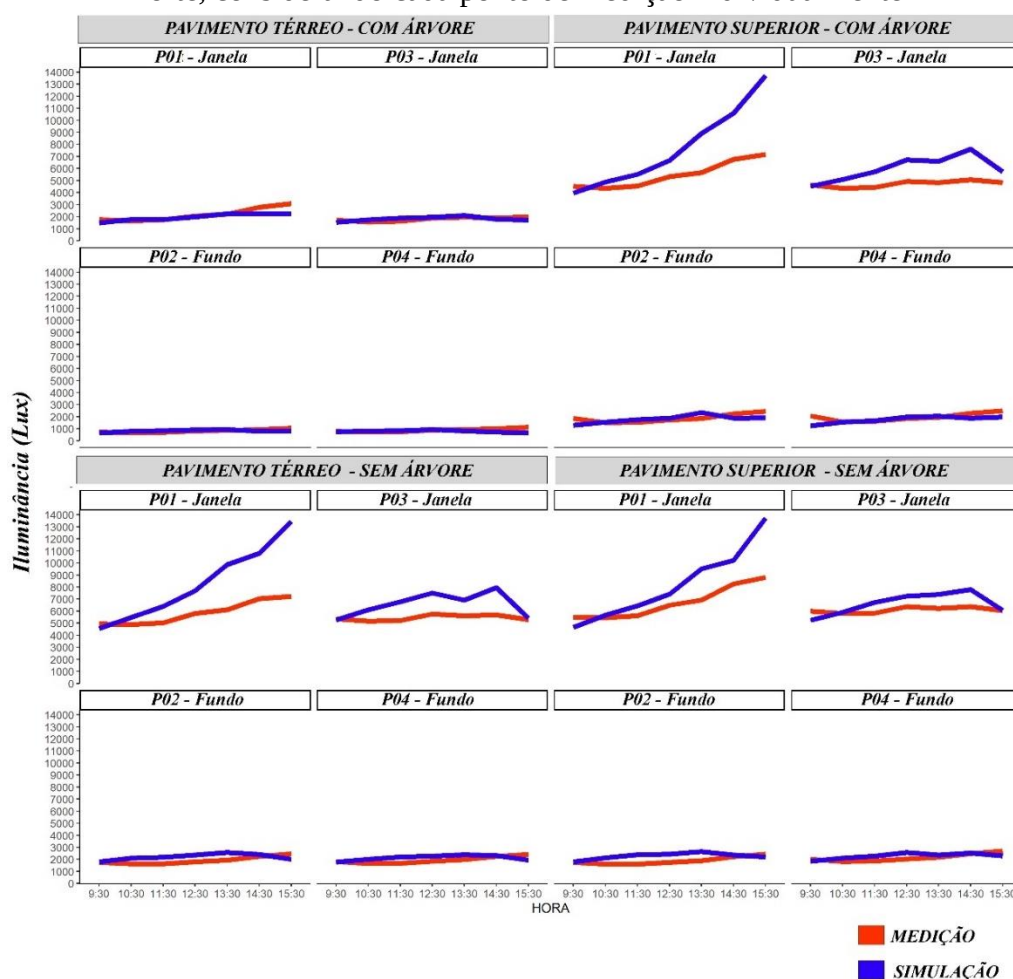
Fonte: dados da pesquisa, 2023.

Para cada ponto de medição, foi analisado comparativamente o comportamento da

iluminância horizontal medida e simulada em função da hora. Foi realizada uma análise das diferenças encontradas entre medição e simulação, descrevendo os erros em relação às medições de referência. Para isso, foram utilizados os indicadores estatísticos raiz quadrada do erro médio – RMSE e o erro absoluto médio – MBE. Os resultados das simulações são considerados confiáveis se o MBE for inferior a 20% e o RMSE for inferior a 35% (REINHART; BRETON 2009).

A Figura 58 apresenta os resultados do comportamento médio da iluminância para a orientação norte. Observa-se que, nos pontos próximos à janela do pavimento térreo sem árvore e superior com e sem árvore, a simulação superestima a iluminação nestes pontos, principalmente no período da tarde, provavelmente devido à presença de luz solar direta nestes horários. No pavimento térreo com a presença da árvore e nos pontos mais para o fundo dos ambientes nos demais pavimentos, nota-se que as simulações reproduzem a iluminância medida muito de perto.

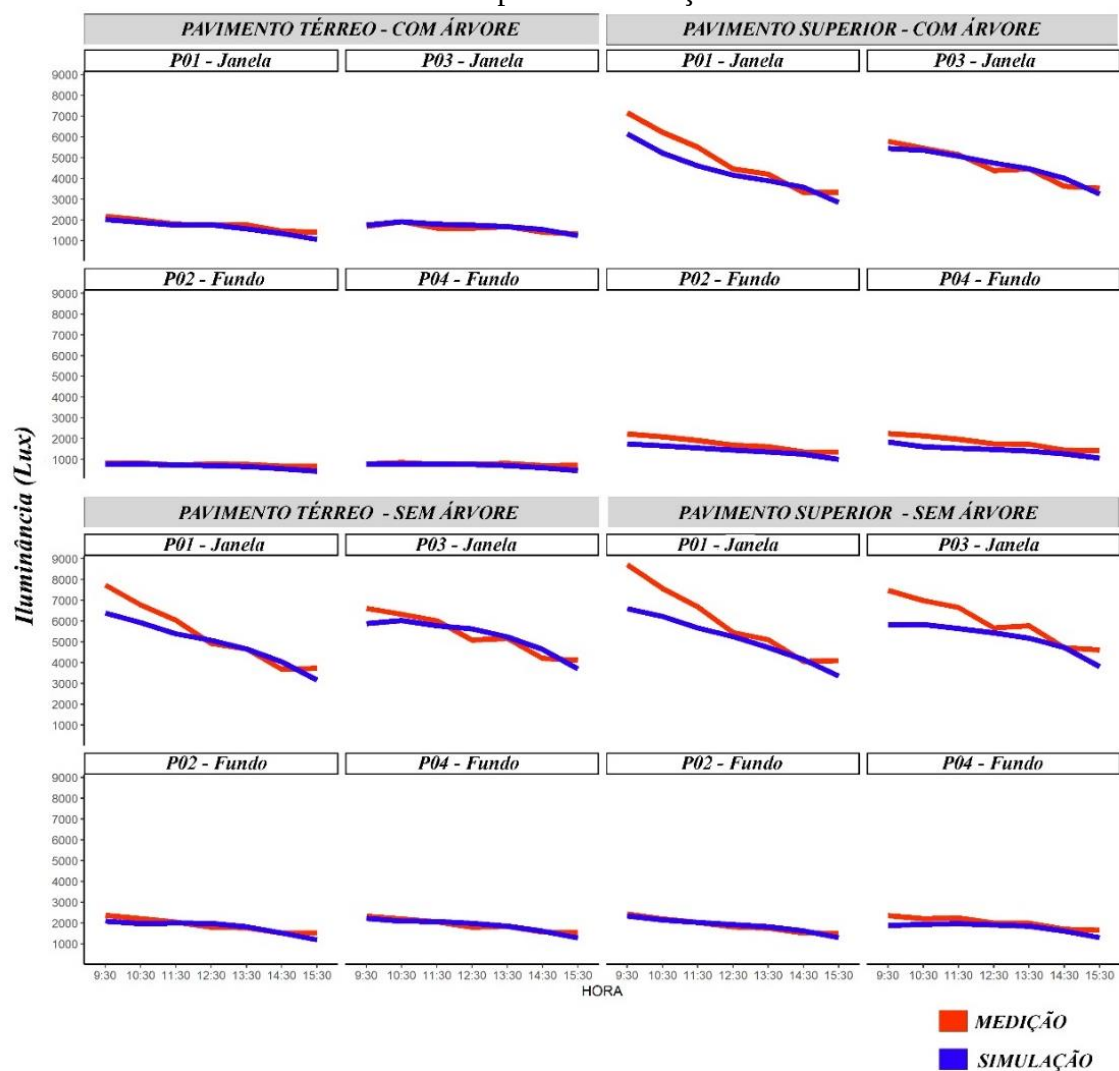
Figura 58 – Comportamento da iluminância média medida e simulada para a orientação norte, considerando cada ponto de medição individualmente



Fonte: dados da pesquisa, 2023.

Para a orientação sul (Figura 59), observa-se uma melhor concordância entre a iluminância medida e simulada, embora, em alguns momentos, principalmente no período da manhã, a iluminância simulada seja subestimada em relação à iluminância medida nos pontos mais próximos à janela.

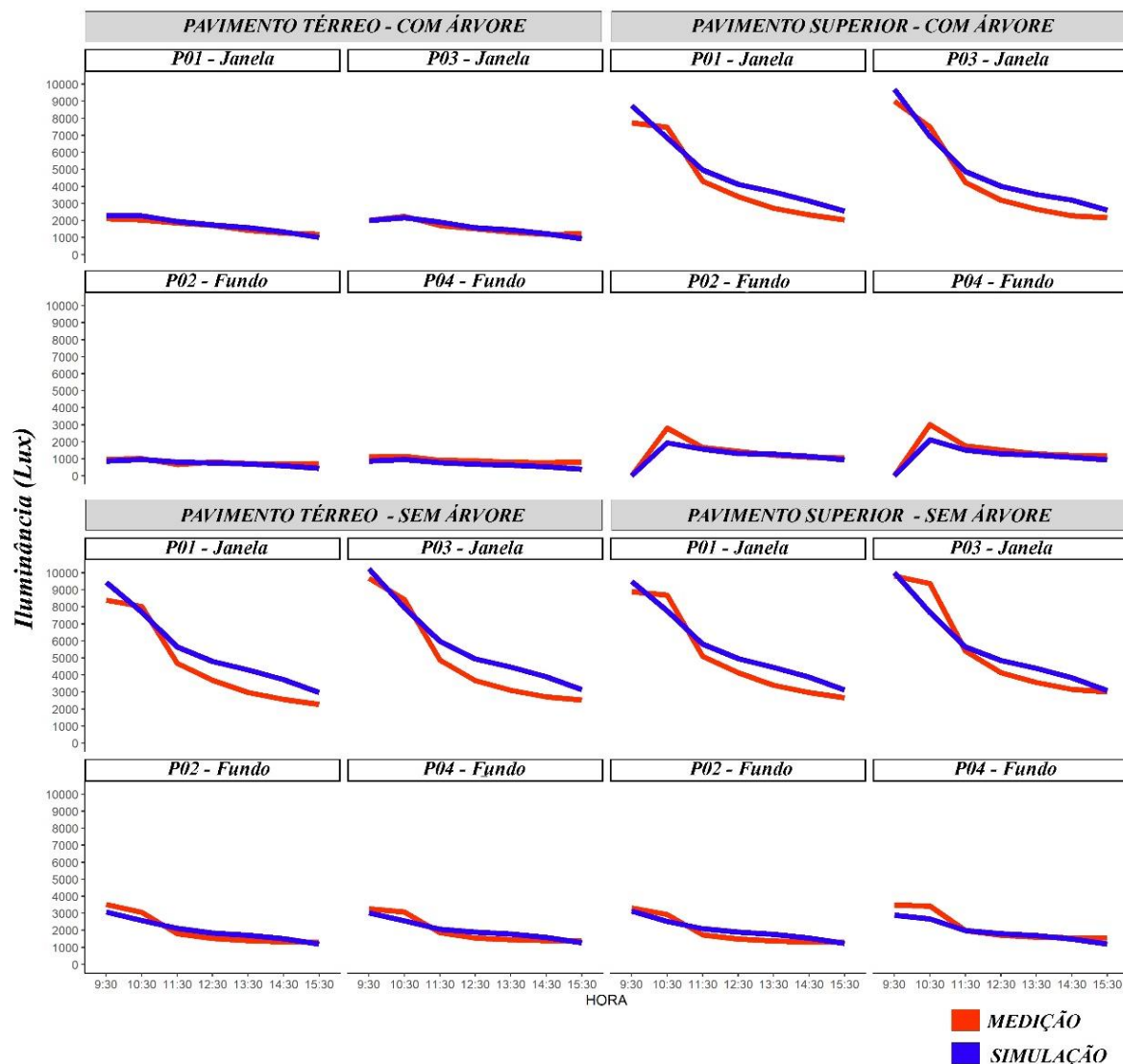
Figura 59 – Comportamento da iluminância média medida e simulada para a orientação sul, considerando cada ponto de medição individualmente



Fonte: dados da pesquisa, 2023.

A Figura 60 apresenta o comportamento da iluminância para a orientação leste. O comportamento da luz no decorrer do dia, entre os dados medidos e simulados, obedece a uma mesma tendência em todos os cenários. Assim como nas demais orientações, observa-se maior uniformidade da luz e maior concordância entre os grupos de dados no pavimento térreo com árvore e nos pontos mais próximos ao fundo do ambiente.

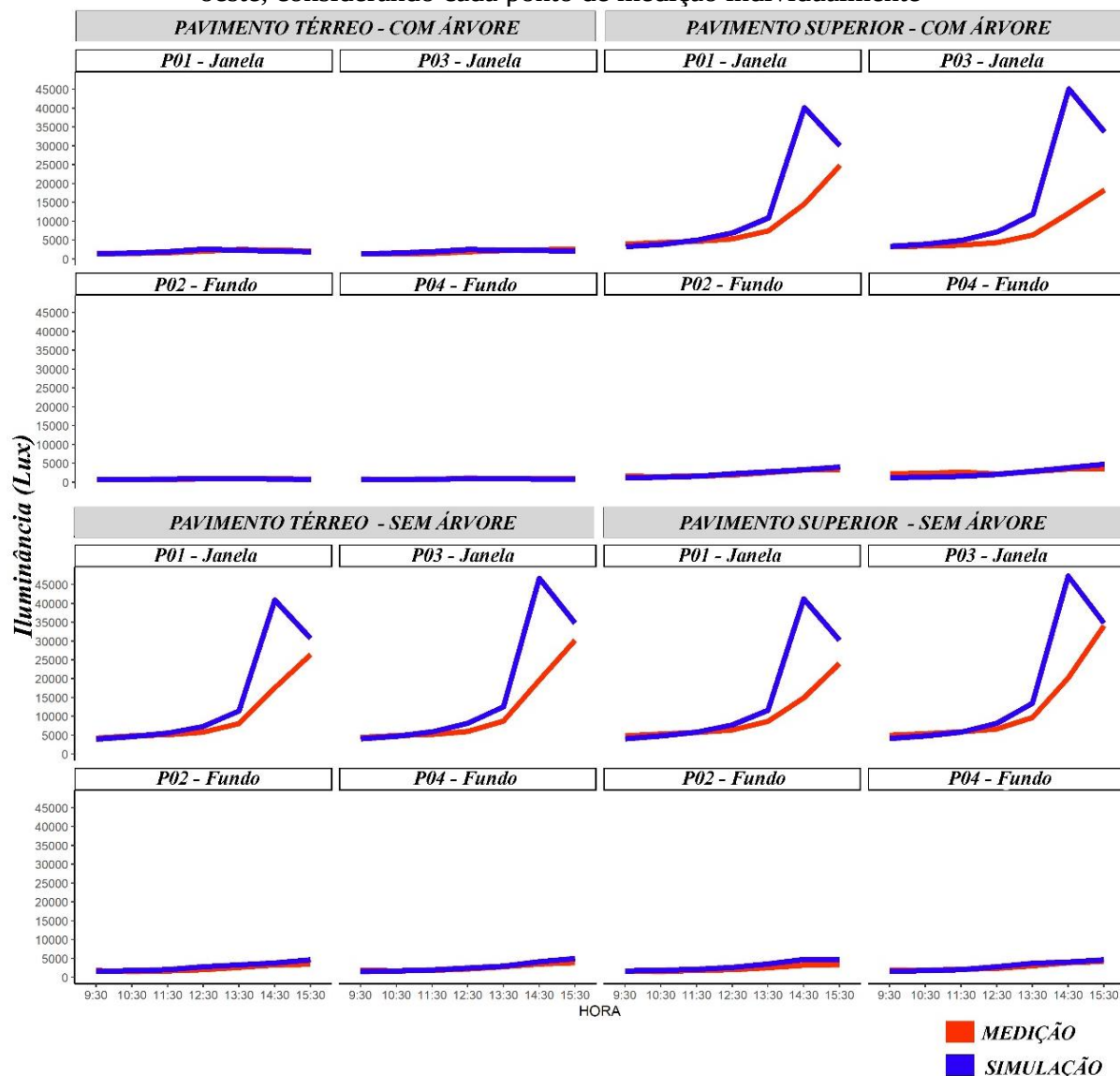
Figura 60 – Comportamento da iluminância média medida e simulada para a orientação leste, considerando cada ponto de medição individualmente



Fonte: dados da pesquisa, 2023.

Na orientação oeste (Figura 61), observa-se que a superestimação da iluminância simulada ocorre nos horários em que a luz solar direta entra no ambiente (período da tarde). Da mesma forma que, nas demais orientações, a melhor concordância ocorreu para os pontos próximos ao fundo do ambiente e no pavimento térreo com a presença da árvore. Nota-se que, nesta orientação, no horário das 14 horas, ocorreu uma discrepância na iluminância simulada em relação à medida, esse fato pode ter contribuído para o erro entre os dois conjuntos de dados.

Figura 61 – Comportamento da iluminância média medida e simulada para a orientação oeste, considerando cada ponto de medição individualmente



Fonte: dados da pesquisa, 2023.

A Tabela 24 apresenta o MBE e RMSE para cada ponto de medição/simulação. Os valores de MBE e RMSE acima de 20% e 35% estão destacados em vermelho para sinalizar um valor excepcionalmente alto. Observa-se que o MBE e o RMSE tendem a ser maiores, principalmente nos pontos mais próximos à janela, onde estão expostos a uma quantidade e variabilidade maior de luz. Esse resultado significa que há uma maior dificuldade em prever a iluminância com maior precisão em locais muito iluminados.

O RMSE extrapolou o limite máximo admitido de 35% em alguns pontos próximos à janela: no P01_J da orientação norte, os pontos P01_J e P03_J do pavimento térreo sem árvore e do pavimento superior com árvore da orientação oeste e os pontos P01_J, P02_J e P03_J do pavimento superior sem árvore também da orientação oeste. Em todas as orientações, a melhor

concordância (MBE e RMSE mais baixos) entre medição e simulação ocorreu para o pavimento térreo com a presença da árvore.

Os erros também foram calculados para a iluminância externa medida e simulada. Os valores de MBE e RMSE foram -14,4% e 16,1%, respectivamente. Com estes resultados, observa-se que a iluminância simulada é subestimada (MBE negativo) em relação à iluminância medida e que o erro entre estas duas situações (16,1%) é inferior ao limite máximo aceitável (35%).

Na orientação norte, nota-se que os valores de MBE demonstram que, na maioria dos pontos medidos, a iluminância simulada é superestimada (valores positivos) em relação à iluminância medida. Nesta orientação, desconsiderando o pavimento térreo com árvore, que apresentou melhor ajuste entre medição e simulação, observou-se que os menores valores de MBE e RMSE, MBE entre 6,2% e 22,4% e RMSE entre 14,5% e 34,1% ocorreram para o pavimento superior sem árvore.

Tabela 24 – Resultados do RMSE (raiz quadrada do erro médio) e do MBE (erro absoluto médio) para a iluminância horizontal considerando cada ponto de medição/simulação

		NORTE		SUL		LESTE		OESTE	
		RMSE (%)	BEM (%)	RMSE (%)	BEM (%)	RMSE (%)	BEM (%)	RMSE (%)	BEM (%)
PAV. TÉRREO COM ÁRVORE	P01_t	18,2	-10,2	9,7	-7,7	9,0	4,8	13,5	0,8
	P02_t	17,1	-0,4	15,9	-12,6	16,6	-7,6	10,9	2,2
	P03_t	10,3	1,1	7,3	4,1	8,9	0,9	17,4	4,2
	P04_t	25,4	-11,6	14,9	-10,2	26,8	-24,9	12,0	-6,6
PAV. TÉRREO SEM ÁRVORE	P05_t	55,2	42,0	13,0	-7,8	21,5	18,4	87,8	45,0
	P06_t	23,9	14,9	10,7	-5,0	16,6	0,9	27,3	21,7
	P07_t	25,1	20,5	8,1	-1,7	20,0	16,0	93,2	47,7
	P08_t	19,2	9,3	6,9	-1,7	15,4	1,3	18,8	10,6
PAV. SUPERIOR COM ÁRVORE	P01_s	58,3	41,5	14,1	-10,9	18,2	13,6	107,0	53,6
	P02_s	20,8	-4,2	19,4	-18,1	23,2	-11,6	15,0	4,7
	P03_s	31,9	27,0	5,6	-0,1	16,2	12,3	189,1	113,3
	P04_s	20,2	-10,9	20,5	-19,7	24,0	-17,5	30,7	-7,4
PAV. SUPERIOR SEM ÁRVORE	P05_s	34,1	22,4	18,0	-13,7	15,8	10,2	103,3	51,0
	P06_s	28,1	20,2	5,8	-0,5	16,8	5,7	39,6	31,6
	P07_s	14,5	8,7	15,7	-13,0	14,8	2,7	83,3	36,2
	P08_s	15,5	6,2	13,7	-12,0	17,8	-10,3	13,2	5,2

Fonte: dados da pesquisa, 2023.

Sobre a orientação sul, observa-se que, na maioria dos casos, a iluminância simulada é subestimada (MBE negativo) em relação à iluminância medida. Esta orientação, como um todo, apresentou a melhor concordância entre os conjuntos de dados comparados, com os MBEs e RMSEs mais próximos de zero. O RMSE está na faixa de 5,6% a 20,5%, e o MBE varia entre

0,1% e 19,7%.

A iluminância simulada é superestimada (MBE positivo) em grande parte dos pontos da orientação leste, o RMSE está na faixa de 8,9% a 26,8%, e o MBE varia entre 0,9% e 24,9%. Nesta orientação, as melhores concordâncias ocorreram para os pontos próximos à janela do pavimento térreo com árvore e superior com e sem a presença da árvore.

A orientação oeste registra os maiores erros, principalmente nos pontos próximos à janela do pavimento superior com e sem árvore e no pavimento térreo sem árvore. Nestes cenários, o RMSE variou entre 10,9% e 189,1%, e o MBE variou entre 0,8% e 113,3%. No geral, a melhor concordância da simulação ocorreu para os pontos próximos ao fundo do ambiente.

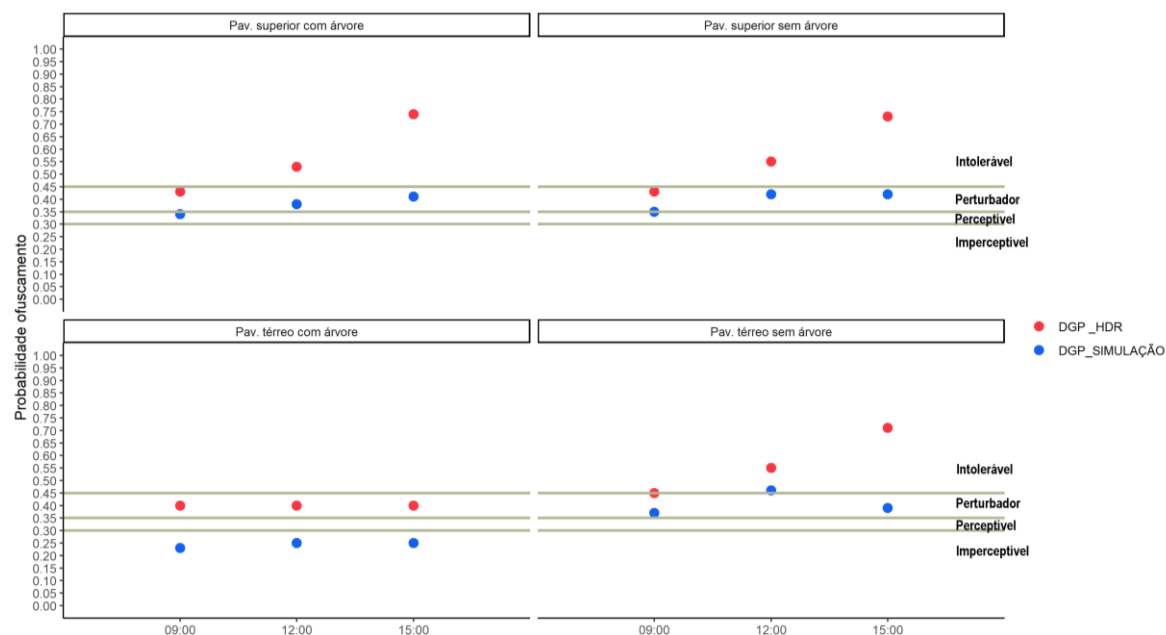
Contudo, estes resultados indicam que, na maioria dos cenários estudados, a simulação reproduziu de forma confiável as condições de iluminância horizontal do mundo real e pode ser, portanto, considerada válida.

4.2.2 PROBABILIDADE DE OFUSCAMENTO – DGP

Este item compara os valores de DGPs extraídos das imagens HDR com os DGPs extraídos das simulações computacionais. Os DGPs obtidos a partir das imagens HDR correspondem ao dia 25 de julho de 2022. Para obter os valores dos DGPs simulados, foi calculada a média considerando os dias dos meses de julho e agosto para cada horário correspondente. As Figuras 61 a 64 resumem os resultados da comparação para cada cenário.

Na orientação norte (Figura 62), observa-se que os DGPs simulados são subestimados em relação aos DGPs extraídos das imagens HDR em todos os horários. No entanto, estes dados seguem aproximadamente o mesmo comportamento. Na maioria dos casos registrados, ocorreu mudança da classificação do ofuscamento, como é o caso do pavimento térreo com a presença da árvore, onde o ofuscamento medido (DGP_HDR) foi classificado como perturbador e passou a ser imperceptível, considerando o DGP simulado. Nota-se, ainda, que, no período da tarde, a diferença entre os dois conjuntos de dados aumenta. Provavelmente, isto está associado à presença da luz solar direta dentro do ambiente

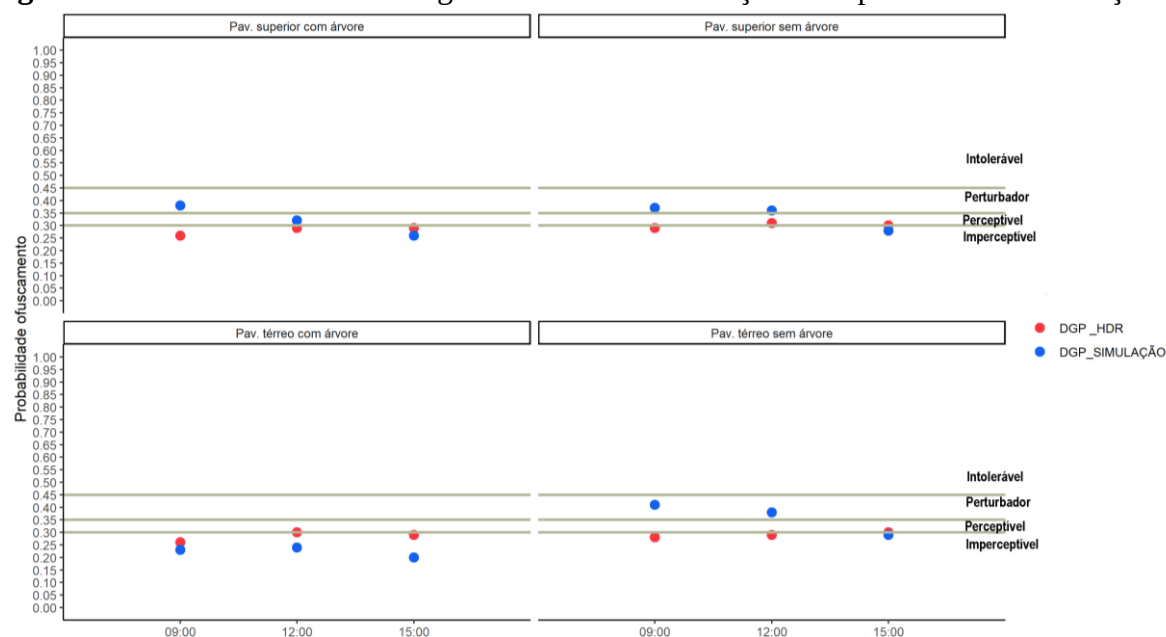
Figura 62 – DGP extraído das imagens HDR e das simulações computacionais: orientação norte



Fonte: dados da pesquisa, 2023.

Na orientação sul (Figura 63), observa-se uma maior concordância entre os DGPs das imagens HDR e simulados. Este fato pode ser associado à ausência de luz solar direta no interior dos ambientes nesta orientação. No pavimento térreo com árvore e no horário das 15 horas dos demais cenários, o DGP simulado foi subestimado. Ocorreu mudança de classificação do ofuscamento, mas com diferenças muito baixas.

Figura 63 – DGP extraído das imagens HDR e das simulações computacionais: orientação sul

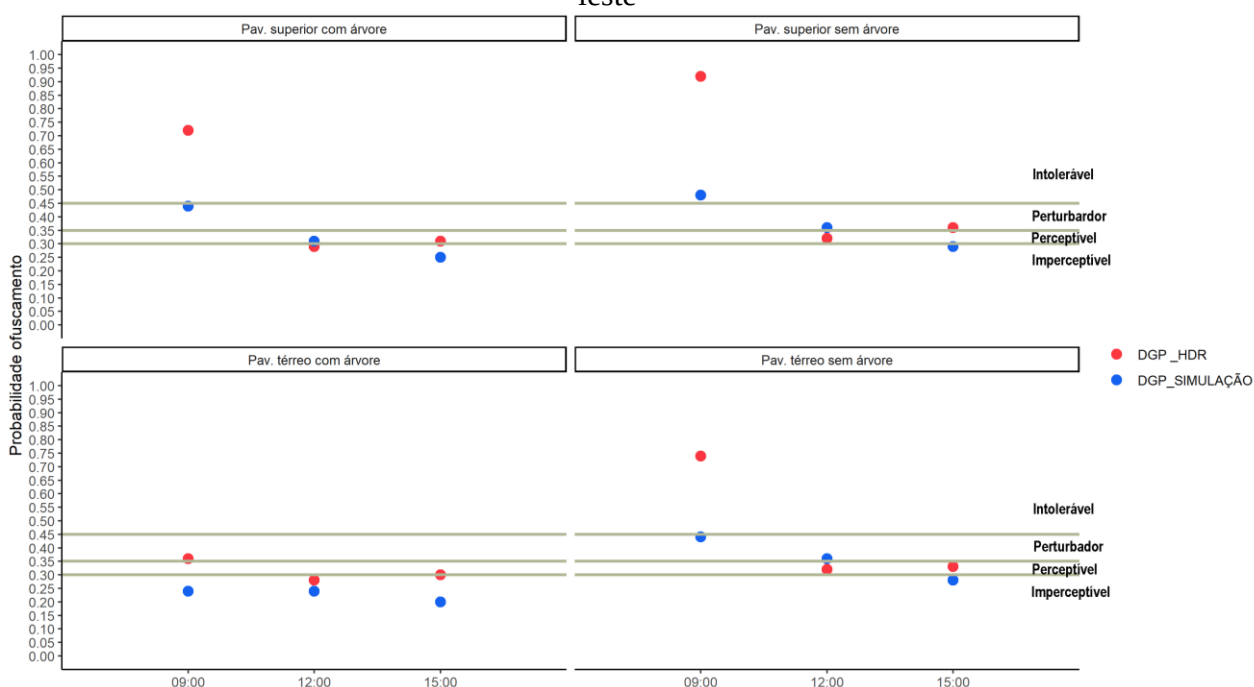


Fonte: dados da pesquisa, 2023.

A Figura 64 apresenta os DGPs comparativos para a orientação leste. Observa-se maior diferença entre os grupos de dados no horário da manhã no pavimento superior com e sem árvore e no pavimento térreo sem a presença da árvore. Nestes casos, o DGP_HDR é superestimado, devido, principalmente, à presença da luz solar direta, como também pode existir uma contribuição do entorno.

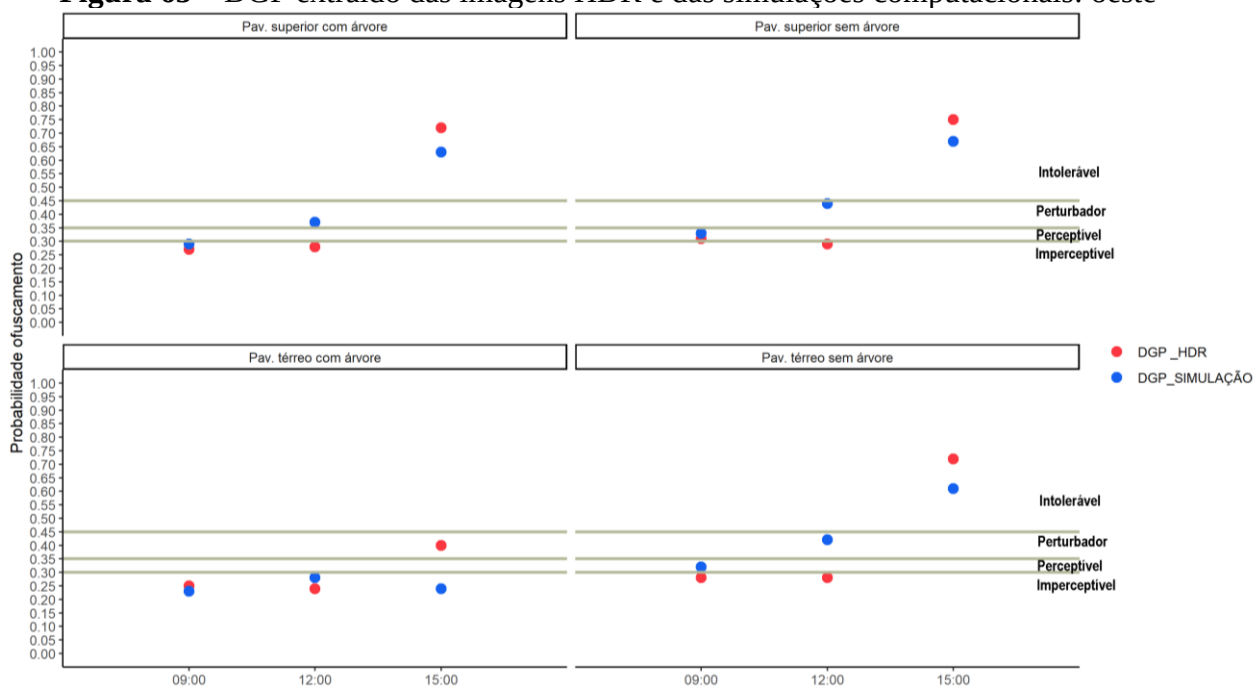
A presença da árvore no pavimento térreo foi capaz de aproximar significativamente o DGP medido e simulado no período da manhã. Nota-se ainda que o DGP simulado foi subestimado em todos os casos, exceto no horário do meio-dia.

Figura 64 – DGP extraído das imagens HDR e das simulações computacionais: orientação leste



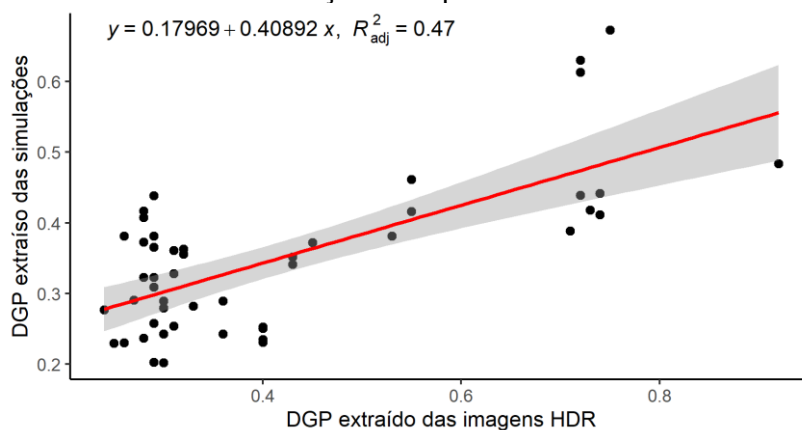
Fonte: dados da pesquisa, 2023.

Na orientação oeste (Figura 65), notam-se diferenças mínimas entre os grupos de dados no horário da manhã. Apesar da presença da luz solar direta no período da tarde, existe uma maior concordância entre os grupos DGP_HDR e DGP_SIMULADO, diferente do que ocorreu nas orientações norte e leste. Isto pode estar associado ao entorno do local onde as fotografias foram registradas.

Figura 65 – DGP extraído das imagens HDR e das simulações computacionais: oeste

Fonte: dados da pesquisa, 2023.

A correlação entre DGP extraído das imagens HDR e DGP extraído das simulações foi analisada por meio do coeficiente de Spearman (ρ). Foi considerado $\rho < 0,5$ (correlação fraca), $> 0,7$ (moderada), $> 0,9$ (forte). O teste de correlação mostrou que há uma correlação positiva e fraca ($\rho = 0,498$, $p\text{-valor} < 0,001$). A Figura 66 apresenta graficamente o comportamento dessa correlação. O coeficiente de determinação (R^2) foi igual a 0,47, indicando que os resultados são estatisticamente significativos em 47% das observações. Isso já é esperado devido, principalmente, à entrada direta da luz do sol no espaço em alguns horários e à consequente alteração da distribuição da iluminância nas superfícies.

Figura 66 – Correlação entre DGP extraído das imagens HDR e DGP extraído das simulações computacionais

Fonte: dados da pesquisa, 2023.

4.3 Impacto da vegetação arbórea na iluminação natural

Nesta seção, são apresentados e discutidos os resultados sobre o impacto da vegetação arbórea no desempenho, disponibilidade e qualidade da iluminação natural. Foram utilizados os conjuntos de dados medidos e simulados. As medições sob céu real limitam-se à análise de recorte temporal, entre os dias 18 de fevereiro e 18 de março, das 9 às 15 horas. Já com os dados obtidos com as simulações, é possível analisar o comportamento da luz anualmente. Para isso, propõe-se uma metodologia multicritério que avalie a iluminação natural sob diferentes aspectos: disponibilidade de iluminação natural e conforto visual.

Considerando a disponibilidade de iluminação natural, a análise e a discussão dos resultados foram realizadas com base nos dados de iluminância horizontal obtidos nos cenários internos e no ambiente externo. Para tanto, foram baseadas nas seguintes métricas: Autonomia Espacial da Iluminação Natural (sDA – *Spatial Daylight Autonomy*), Exposição Anual à Luz do Sol (ASE – *Annual Sunlight Exposure*), Fator de Luz do Dia (DF – *Daylighting Factor*) e Iluminância útil da Luz do Dia (UDI – *Useful Daylight Illuminances*).

O conforto visual foi analisado com base nos dados de luminância, por meio de imagens HDR. A métrica adotada foi a probabilidade de ofuscamento (DGP – *Daylight Glare Probability*).

4.3.1 ANÁLISE DA ILUMINAÇÃO NATURAL, CONSIDERANDO MEDIÇÕES SOB CÉU REAL

Considerando as condições com árvore e sem árvore nos dois pavimentos separadamente, o teste de Mann-Whitney mostrou que a mediana e/ou distribuição das iluminâncias são diferentes em todas as situações, conforme Tabelas 25 a 28. Desta forma, a hipótese nula é rejeitada, aceitando a hipótese alternativa de que os grupos com árvore e sem árvore são estatisticamente diferentes ($p \leq 0,05$). O tamanho do efeito também é apresentado segundo o método de linguagem comum, conforme descrito por Kerby (2014) e Espírito-Santo e Daniel (2015).

Na orientação norte, a probabilidade de a iluminância registrada no pavimento térreo sem árvore ser maior que a iluminância registrada na condição com árvore é 87,02%. No pavimento superior, esta probabilidade passa a ser 56,81%. Este mesmo comportamento se repete nas demais orientações.

Tabela 25 – Resultados do teste de Man-Whitney para a orientação norte

NORTE						
	Pavimento	Condição	Amplitude interquartil	Estatística do teste	Valor p	Tamanho do efeito
Cenários	Pav. térreo	Sem árvore	3722,65	4619277	< 0,0001	85,84%
		Com árvore	1074,14			
	Pav. superior	Sem árvore	4311,45	14091567	< 0,0001	56,81%
		Com árvore	3199,12			

Fonte: dados da pesquisa, 2023.

Tabela 25 – Resultados do teste de Man-Whitney para a orientação sul

SUL						
	Pavimento	Condição	Amplitude interquartil	Estatística do teste	Valor p	Tamanho do efeito
Cenários	Pav. térreo	Sem árvore	3278,11	3519115	< 0,0001	89.45%
		Com árvore	913,4			
	Pav. superior	Sem árvore	3757,82	13671744	< 0,0001	59.02%
		Com árvore	2803,14			

Fonte: dados da pesquisa, 2023.

Tabela 26– Resultados do teste de Man-Whitney para a orientação leste

LESTE						
	Pavimento	Condição	Amplitude interquartil	Estatística do teste	Valor p	Tamanho do efeito
Cenários	Pav. térreo	Sem árvore	2510,56	5952169	< 0,0001	81,81%
		Com árvore	922,54			
	Pav. superior	Sem árvore	2696,32	13624256	< 0,0001	58,34%
		Com árvore	2295,75			

Fonte: dados da pesquisa, 2023.

Tabela 27 – Resultados do teste de Man-Whitney para a orientação oeste

OESTE						
	Pavimento	Condição	Amplitude interquartil	Estatística do teste	Valor p	Tamanho do efeito
Cenários	Pav. térreo	Sem árvore	4518,89	3736132	< 0,0001	88.45%
		Com árvore	1161,23			
	Pav. superior	Sem árvore	4969,78	14540056	< 0,0001	55.31%
		Com árvore	4917,36			

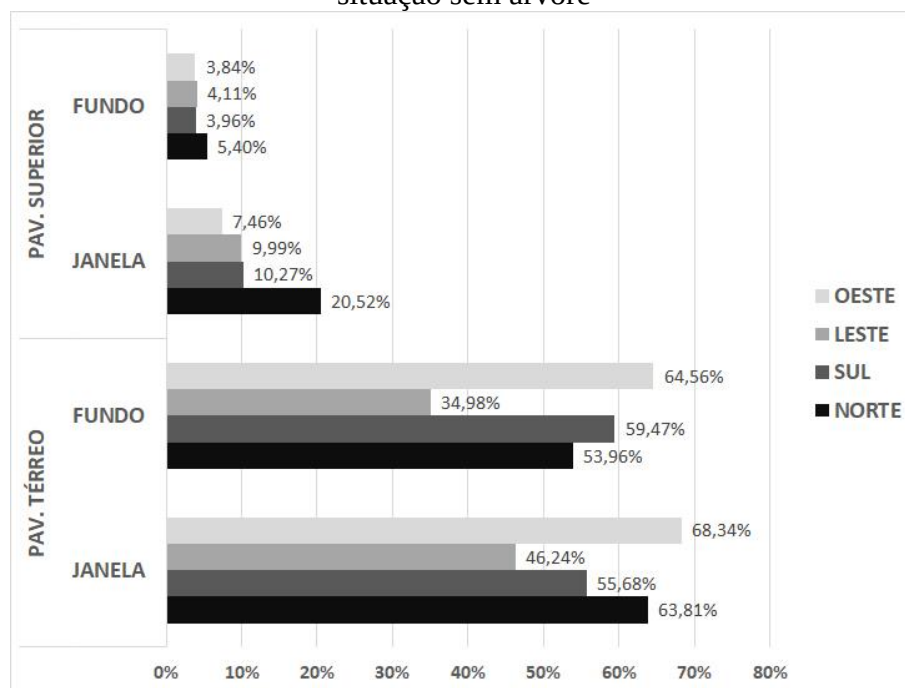
Fonte: dados da pesquisa, 2023.

O gráfico da Figura 67 mostra os percentuais de redução da iluminância da situação com a presença da árvore em relação à situação sem a presença da árvore. Para demonstrar estas reduções, os ambientes foram divididos em duas porções: a porção mais próxima à janela e a porção no fundo do ambiente.

É possível observar que as maiores reduções ocorreram para o pavimento térreo, principalmente para a orientação oeste, chegando a quase 70% de redução dos níveis de

iluminâncias registrados. O comportamento das reduções da luz, considerando as duas porções do ambiente (janela e fundo), é bastante semelhante em todas as orientações para este pavimento.

Figura 67 – Percentuais de redução da iluminância da situação com árvore em relação à situação sem árvore



Fonte: dados da pesquisa, 2023.

Observam-se, no pavimento superior, as menores reduções dos níveis de iluminação natural. Na parte mais próxima à janela, os percentuais de redução entre as orientações apresentam-se entre 7,5% e 20,5%. Para a parte correspondente ao fundo do ambiente, as reduções entre as orientações são de, aproximadamente, 3,8% e 5,4%.

4.3.1.1 Influência de algumas variáveis nos níveis de iluminância

Com o objetivo de verificar o grau de influência de algumas variáveis no desempenho da luz natural nos casos estudados, foi construído um modelo de regressão logística binária. O modelo assumiu que a variável dependente é a iluminância, agrupada em dois conjuntos de dados, abaixo de 3000 lux (preferível) e acima de 3000 lux (excessiva). Este limite estabelecido foi baseado no limite superior de UDI, conforme estudado por Mardaljevic (20015). As variáveis explicativas consideradas foram a árvore (ausência ou presença), o pavimento (térreo ou superior), o turno (manhã ou tarde) e a orientação (norte, sul, leste e oeste).

O modelo mostrou que a árvore, o pavimento, o turno e a orientação, exceto a orientação sul, são previsores estatisticamente significativos para o desempenho da iluminação natural (preferível ou excessivo) no ambiente interno da amostra estudada. Este resultado foi verificado com base no valor p e na razão de chance (OR) com nível de significância de 95%.

Considerando a variável árvore, observa-se que a chance de a iluminação ser considerada excessiva sem a presença da árvore é 3,3 (230%) vezes maior que com a presença da árvore. Com relação à variável pavimento, a chance de a iluminação ser considerada excessiva no pavimento superior é 2,93 vezes (193%) maior que no pavimento térreo. A chance de a iluminação excessiva ocorrer no turno da tarde é 0,81 vezes menor do que no turno da manhã. Ou seja, a iluminação excessiva tem 19% menos chance de ocorrer no turno da tarde (Tabela 29).

Com relação à variável orientação, foi tomada como referência a norte. Para a orientação leste, a chance de a iluminação ser considerada excessiva é 0,757 vezes (24,3%) menor que na orientação norte. Em oeste, a chance de a iluminação ser excessiva é 1,49 (49%) vezes maior do que na orientação norte. A orientação sul não foi considerada estatisticamente significativa para definir o desempenho da iluminação natural na amostra estudada (p -valor > 0,05). Com estes resultados, observa-se que a variável de maior impacto é a presença ou não do elemento arbóreo.

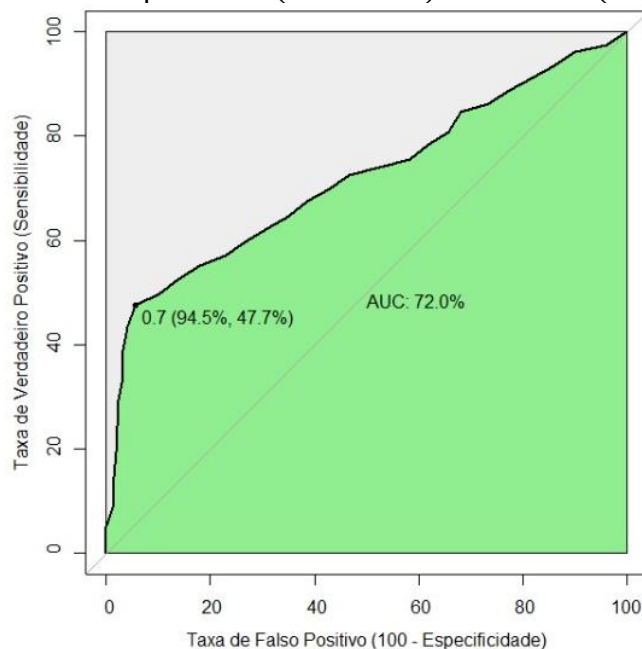
Tabela 29 – Resultados da regressão logística binária. Variável dependente de referência foi a condição preferível

	Coefficiente	Razão de chance - OR	Intervalo de confiança - IC	Valor p
ÁRVORE_ ausente	1,19425	3,3010958	3,2062843 - 3,3987110	< 0,001
PAVIMENTO_superior	1,07550	2,9314483	2,8474463 - 3,0179284	< 0,001
TURNO_tarde	-0,21391	0,8074234	0,7846415 - 0,8308668	< 0,001
ORIENTAÇÃO_leste	-0,27829	0,7570764	0,7266260 - 0,7888030	< 0,001
ORIENTAÇÃO_oeste	0,39868	1,4898578	1,4314252 - 1,5506758	< 0,001
ORIENTAÇÃO_sul	-0,03306	0,9674814	0,9292223 - 1,0073157	0,108

Fonte: dados da pesquisa, 2023.

Uma das formas para avaliar o diagnóstico de modelos estatísticos, neste caso de classificadores binários, passa pela utilização da curva ROC (*Receiver Operating Characteristic*). Na Figura 68, está representada a curva ROC correspondente ao modelo binário de regressão logística descrito anteriormente. Pode-se considerar que as previsões do modelo são consideradas moderadas (AUC = 72,0%).

Figura 68 – Curva ROC do modelo de regressão logística binária da classificação da iluminância em preferível (< 3000 lux) e excessiva (> 3000 lux)



Fonte: dados da pesquisa, 2023.

4.3.1.2 Desempenho lumínico segundo as métricas sDA, ASE, UDI e DF

Visando avaliar o desempenho lumínico em relação a uma referência normativa vigente, foram consideradas as métricas dinâmicas da luz do dia presentes na norma IES-LM-83-12: Autonomia Espacial da Iluminação Natural (sDA – *Spatial Daylight Autonomy*) e Exposição Anual à Luz do Sol (ASE – *Annual Sunlight Exposure*). Também foram realizadas análises com base no Fator de Luz do Dia (DF – *Daylight Factor*) e Iluminância Útil da Luz do Dia (UDI – *Useful Daylight Illuminances*). Estas análises foram realizadas considerando cada ponto de registro individualmente, com e sem a presença da árvore, permitindo uma avaliação comparativa entre as duas situações.

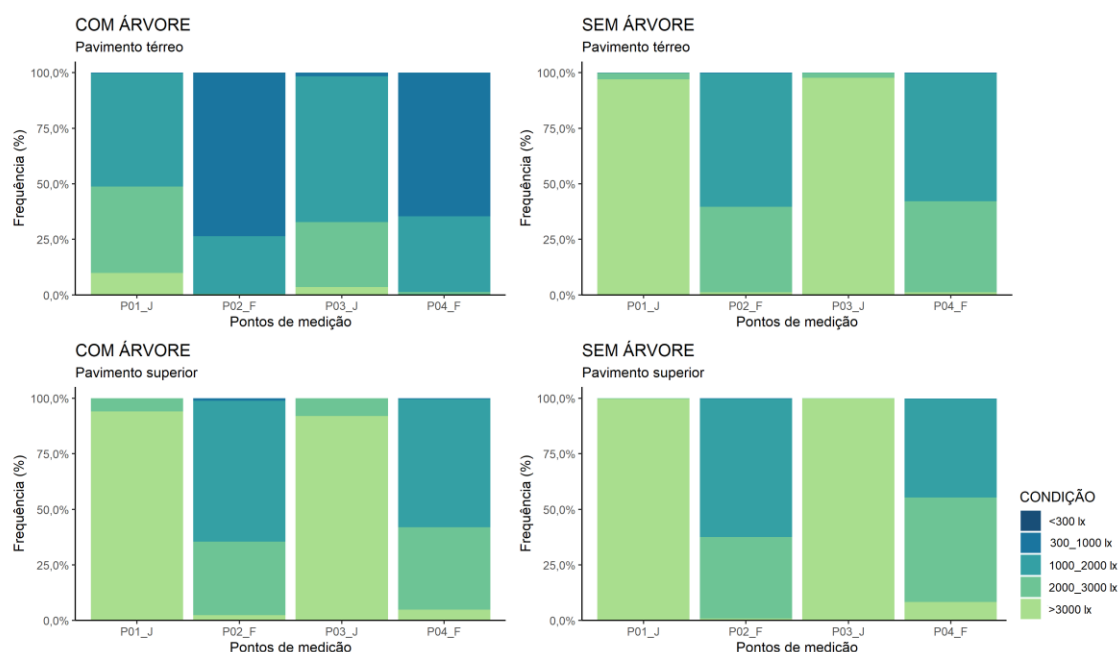
O sDA e ASE, que quantificam a suficiência de luz do dia e a possibilidade de desconforto visual causado pela luz solar direta, conforme recomendado pela IES LM-83-12, foram calculados e resumidos como segue nos parágrafos seguintes. O sDA foi analisado considerando o requisito mínimo de iluminância de 300 lux para 50% do tempo em cada ponto de medição. O ASE foi analisado, considerando a porcentagem do espaço que excede 1000 lux durante todo o tempo de medição.

Considerando os gráficos das Figuras 69 a 72, verificou-se que, em todas as situações analisadas, o sDA com 300 lux como limite mínimo de iluminância corresponde a 100% da

área de todos os cenários analisados. Isso caracteriza ambientes que, independentemente da condição (com ou sem árvore), da orientação (norte, sul, leste ou oeste) e do pavimento (térreo ou superior), receberam luz natural minimamente suficiente durante todo o período de medição.

O ASE estabelece um limite acima de 1000 lux, a partir do qual se considera que pode causar desconforto visual aos ocupantes. Este limite foi excedido em quase 100% do tempo de medição nos pavimentos térreo sem árvore e superior com e sem a presença da árvore. Apenas os pontos próximos ao fundo do ambiente (P01_F e P02_F) do pavimento térreo com árvore registraram iluminância abaixo de 1000 lux em aproximadamente 75% do tempo de medição. Este comportamento repetiu-se em todas as orientações. Desta forma, considera-se que, no pavimento térreo sem árvore e nos pavimentos superiores com e sem árvore, o ASE é de 100% em todos os pontos medidos. E que o pavimento térreo com a presença da árvore apresentou ASE de, aproximadamente, 75% para os pontos P02_F e P04_F e 100% para os pontos P01_J e P03_J.

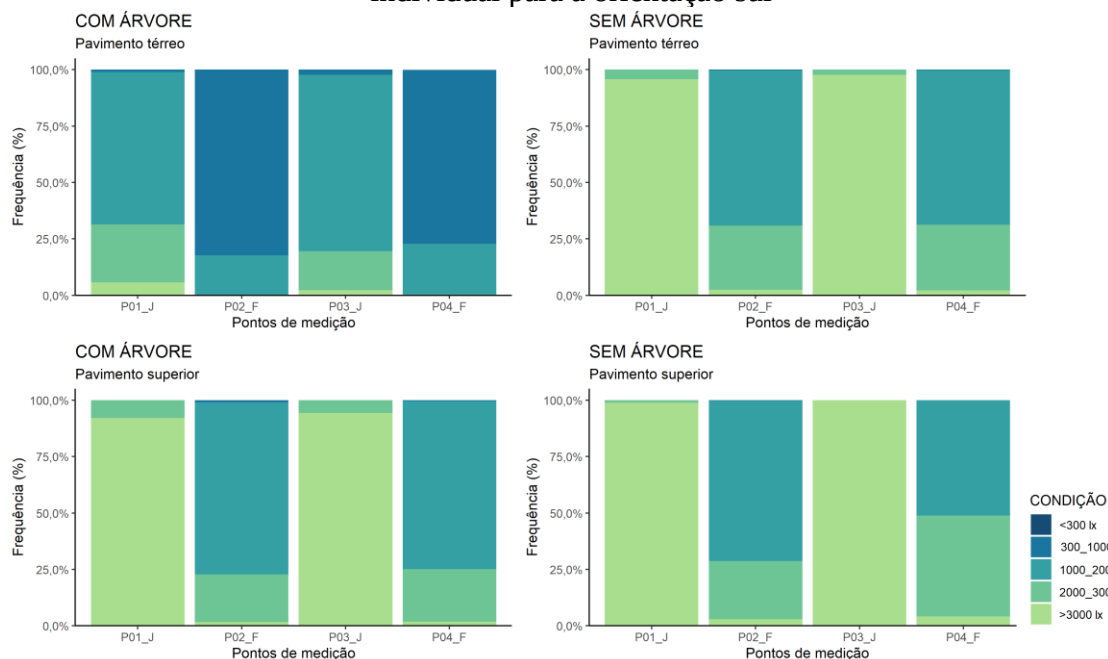
Figura 69 – Frequência de ocorrência da iluminância considerando cada ponto de medição individual para a orientação norte



*P01_J e P02_J – pontos próximos a janela; P01_F e P02_F – pontos próximos ao fundo do ambiente.

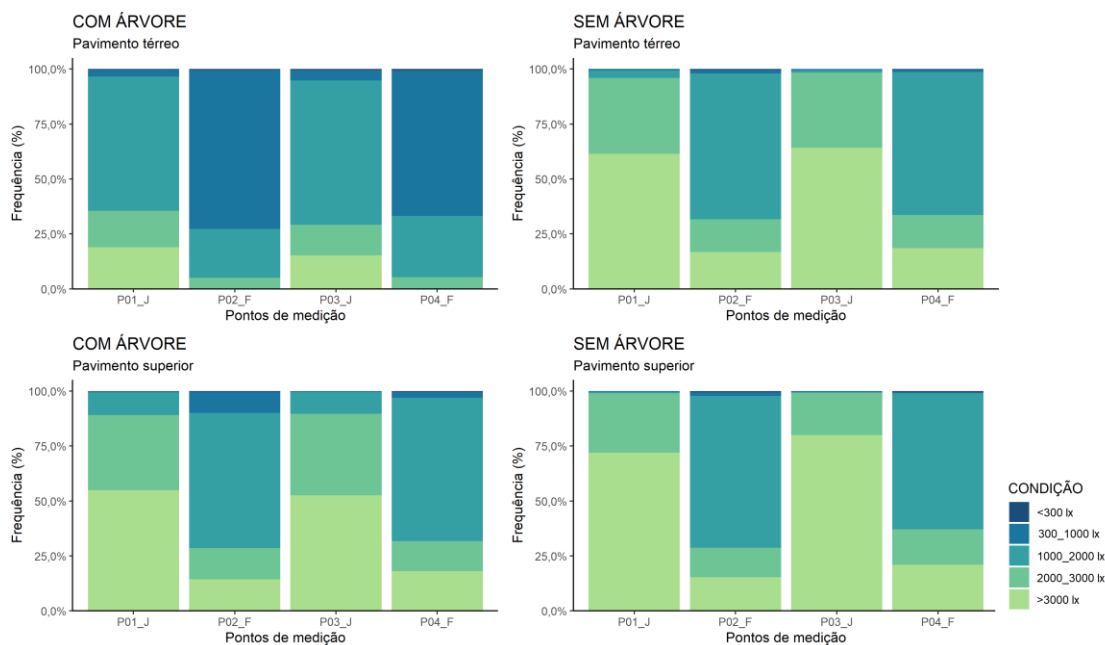
Fonte: dados da pesquisa, 2023.

Figura 70 – Frequência de ocorrência da iluminância considerando cada ponto de medição individual para a orientação sul



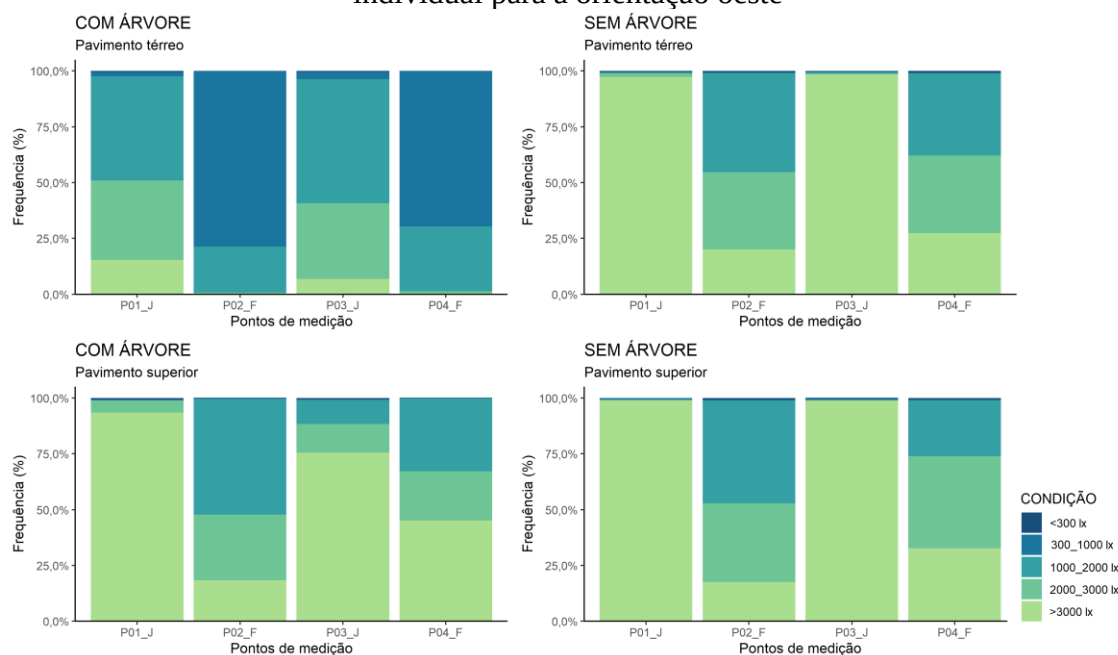
*P01_J e P02_J – pontos próximos a janela; P01_F e P02_F – pontos próximos ao fundo do ambiente.
Fonte: dados da pesquisa, 2023.

Figura 71 – Frequência de ocorrência da iluminância considerando cada ponto de medição individual para a orientação leste



*P01_J e P02_J – pontos próximos a janela; P01_F e P02_F – pontos próximos ao fundo do ambiente.
Fonte: dados da pesquisa, 2023.

Figura 72 – Frequência de ocorrência da iluminância considerando cada ponto de medição individual para a orientação oeste



*P01_J e P02_J – pontos próximos a janela; P01_F e P02_F – pontos próximos ao fundo do ambiente.
Fonte: dados da pesquisa, 2023.

O UDI também foi analisado considerando três classificações medidas em percentuais: abaixo de 100 lux, considerado muito escuro; entre 100 e 3000 lux, considerado preferível e iluminância com valor superior a 3000 lux, o que é considerado excessivamente iluminado. De acordo com as Figuras 69 a 72, em nenhuma das condições, a iluminância foi inferior a 300 lux. Portanto, em nenhum caso, a iluminância registrada foi inferior a 100 lux.

Os pontos mais próximos à janela (P01_J e P02_J) do pavimento térreo com a presença da árvore apresentaram mais de 75% da iluminância registrada entre 1000 e 3000 lux em todas as quatro orientações. Nas demais situações, estes pontos registraram, predominantemente, iluminâncias superiores a 3000 lux.

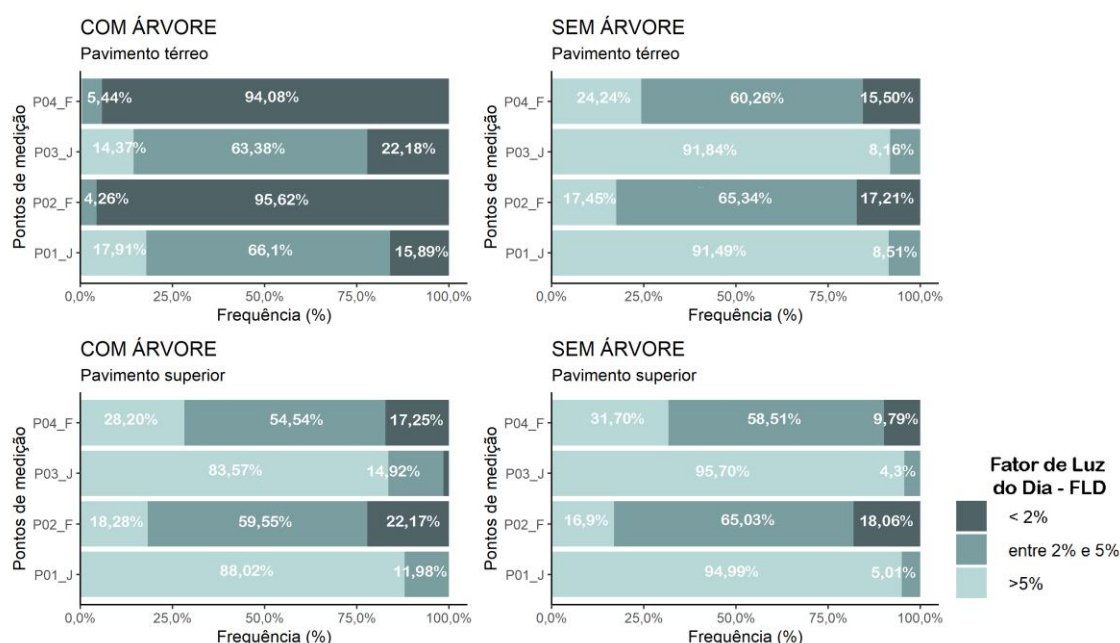
Considerando os pontos P01_F e P02_F, para as orientações norte e sul, observa-se que, aproximadamente, 100% dos registros da iluminância estão entre 300 e 3000 lux, enquadrando-se, portanto, dentro da faixa de iluminância considerada útil. Na orientação leste, a faixa entre 300 e 3000 lux corresponde a, aproximadamente, 75% dos registros. Em oeste, observa-se maior variação da iluminância nestes pontos, nos quais a faixa de iluminância útil variou entre 50% a 75% dos dados registrados.

O Fator de Luz do Dia também foi analisado para os horários em que o céu se manteve encoberto durante os registros, independente da orientação. Segundo a CIBSE, (1999), a escala DF é interpretada sob céu nublado CIE com a seguinte classificação: < 2% – não iluminado

adequadamente; entre 2% e 5% – iluminado adequadamente e > 5% – bem iluminado (mas o brilho e a luz solar direta podem causar problemas).

A Figura 73 apresenta a classificação da escala de FLD para cada ponto de medição individual. O pavimento térreo com a presença da árvore apresentou os menores fatores de luz, especialmente nos pontos próximos ao fundo da sala (P02_F e P04_F), onde quase 100% dos registros de iluminância indicaram $FLD < 2\%$, sugerindo iluminação inadequada. Já nos pontos próximos à janela (P01_J e P02_J), aproximadamente 75% dos registros apresentaram FLD entre 2% e 5%, indicando que essa porção do ambiente é iluminada adequadamente.

Figura 73 – Fator de Luz do Dia (FLD) para cada cenário, considerando apenas a condição de céu encoberto



Fonte: dados da pesquisa, 2023.

O comportamento nas demais situações (pavimento superior com árvore e pavimento térreo/superior sem árvore) tem bastante semelhança entre si. Nos pontos mais próximos à janela, mais de 90% dos registros indicaram $FLD > 5\%$, sugerindo iluminação excessiva. Nos pontos mais ao fundo, a predominância é de FLD entre 2% e 5%.

4.3.1.3 Luminância e imagens de alta faixa dinâmica

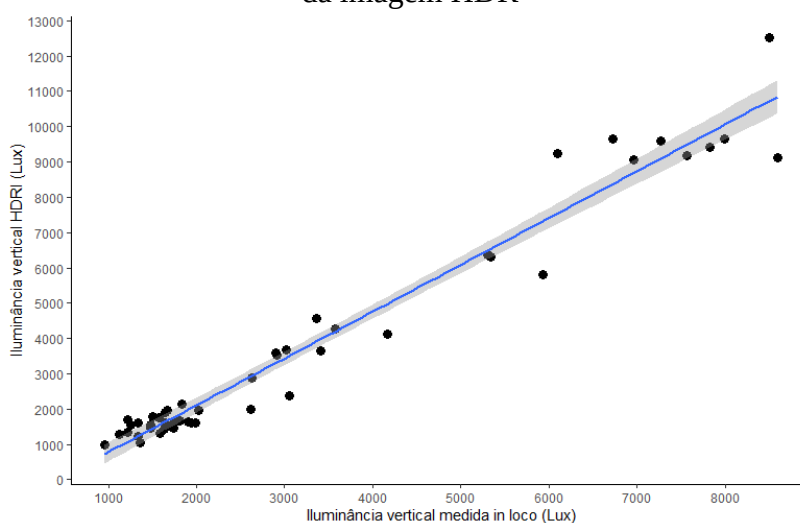
Esta pesquisa empregou imagens HDR (*High Dynamic Range*) e técnicas de pós-processamento que permitem apresentações gráficas de mapas de luminância das cenas estudadas, como também a verificação da probabilidade de ofuscamento dentro do campo de visão da

câmera. Tais representações gráficas contribuem para a percepção e a compreensão do desempenho da iluminação natural no espaço. Os resultados apresentados a seguir são baseados nos procedimentos metodológicos descritos no item 3.2.2.

Cada imagem HDR gerada foi verificada segundo o método de comparação de iluminância antes de ser usada como mapa de luminância. A verificação de iluminância deve ser preferida, especialmente quando se espera alta luminância ($>30.000 \text{ cd/m}^2$) na imagem HDR (PEARSON *et al.*, 2020).

Por meio da correlação de Spearman, verificou-se o ajuste entre a iluminância vertical medida *in loco* e a iluminância vertical extraída da fotografia HDR. O teste de Spearman foi escolhido porque a amostra dos dados verificados não atende ao pressuposto de normalidade, segundo o teste de Shapiro-Wilk. Desta forma, a correlação de Spearman mostrou que há uma correlação positiva e forte entre a iluminância medida *in loco* e a iluminância extraída da imagem HDR ($\rho = 0,92$; $p < 0,001$), conforme gráfico da Figura 74.

Figura 74 – Correlação entre a iluminância vertical medida e a iluminância vertical extraída da imagem HDR



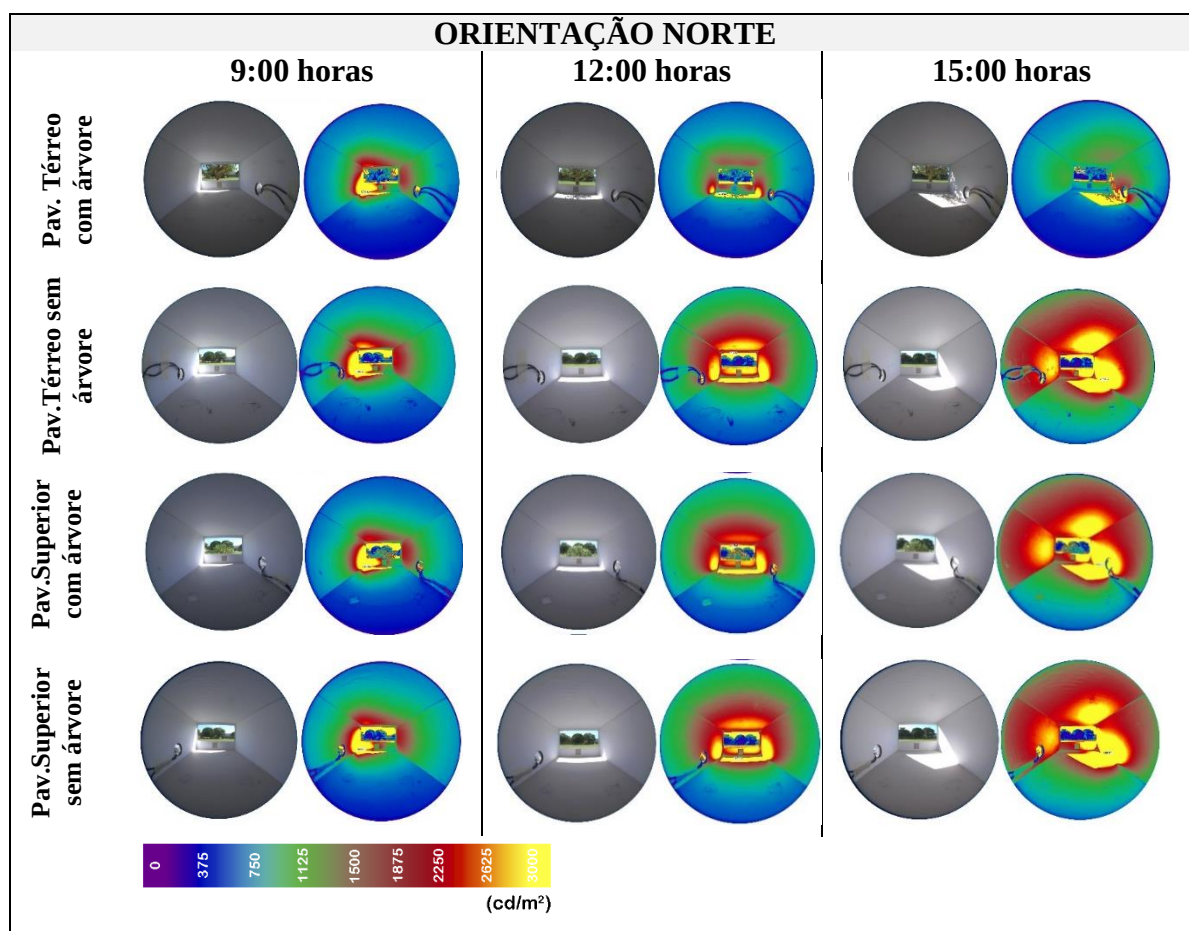
Fonte: dados da pesquisa, 2023.

As imagens HDR deixam evidente a percepção do olho humano. A partir das imagens HDR de cada cena estudada, foi gerada uma imagem com o mapeamento de luminância da cena através de cores falsas (Figuras 75 a 78). As imagens representam três momentos do dia (9 hora, meio-dia e 15 horas) para as quatro orientações. Com base em estudos anteriores (VAN DEN WYMELENBERG, K.; INANICI, M., JOHNSON, P., 2010; VAN DEN WYMELENBERG, K.; INANICI, M., 2015), o limiar adotado foi de 2000 cd/m^2 . Os registros acima desse valor foram considerados excessivos.

Para a orientação norte, observa-se, a partir dos mapas de cores falsas (Figura 75), que as manchas vermelhas e amarelas são mais retraídas nos três horários do pavimento térreo com a presença da árvore, demonstrando predominância de luminâncias mais baixas. Nos demais cenários, o comportamento da distribuição das manchas se assemelha, com menores níveis de luminância às 9 horas e níveis mais elevados às 15 horas. De acordo com a Tabela 30, a luminância média no pavimento térreo com árvore manteve-se semelhante no decorrer dos três horários, entre 840 cd/m^2 e 906 cd/m^2 . O comportamento entre os demais cenários também se assemelha: a menor luminância média registrada foi para o horário das 9 horas, aproximadamente 1000 cd/m^2 , e a maior às 15 horas, com aproximadamente 2200 cd/m^2 .

Considerando ainda esta orientação, a luminância acima de 2000 cd/m^2 do pavimento térreo, com a presença da árvore no horário das 15 horas, corresponde a 2,96% da luminância total da cena. Já considerando a mesma situação, só que sem a presença da árvore, a luminância acima de 2000 cd/m^2 chega a 35,41% de toda luminância registrada no momento.

Figura 75 – Imagens HDR e mapas de luminância com cores falsas para a orientação norte



Fonte: dados da pesquisa, 2023.

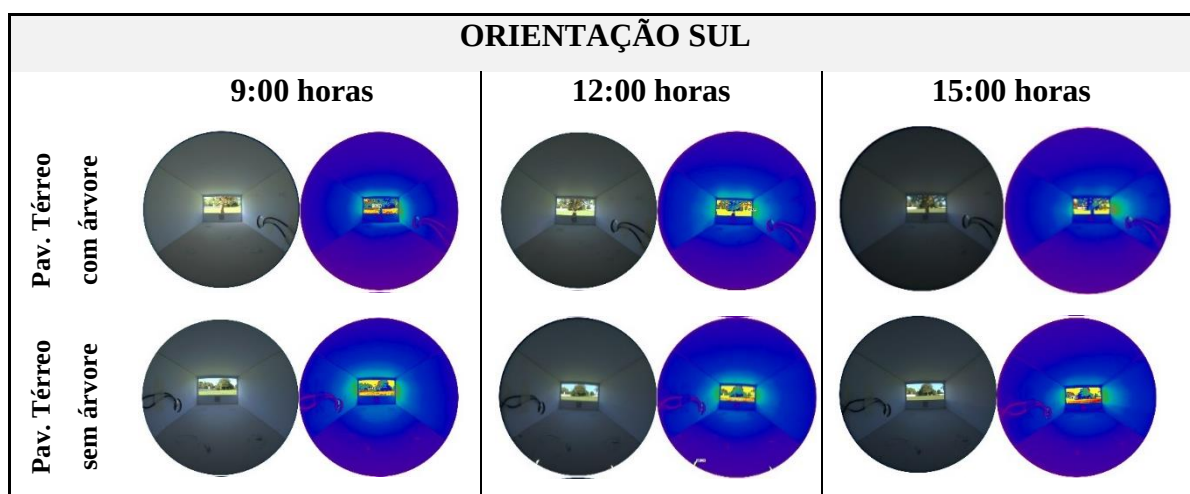
Tabela 30 – Luminâncias das imagens HDR da orientação norte – Estimativas de localização

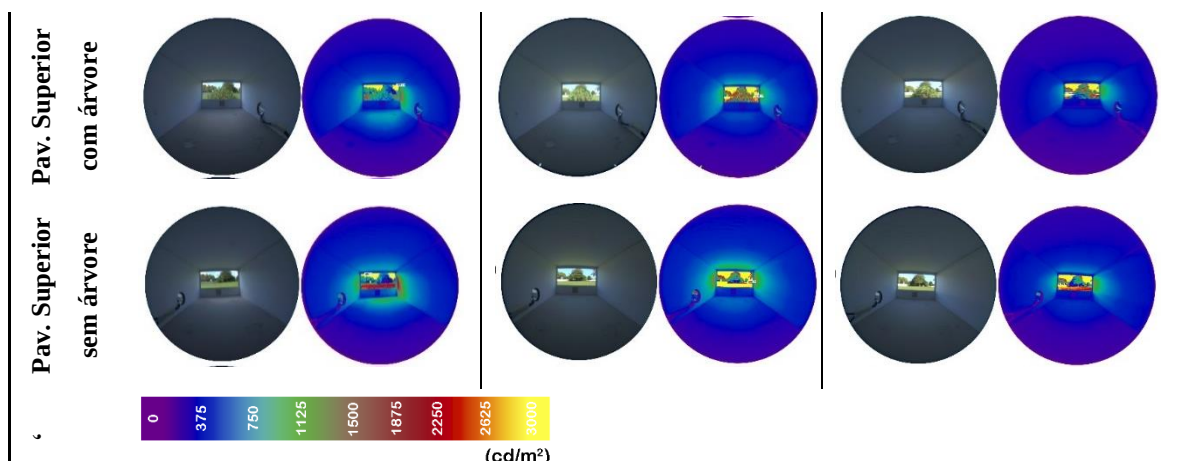
ORIENTAÇÃO NORTE							
CENÁRIO	HORA	Luminância Mínima	Luminância Máxima	Média	Mediana	Desvio padrão	>2000 cd/m ²
P. térreo com árvore	9:00 h	50,18	23.666,30	855,9	642,21	1223,03	3,71%
	12:00 h	35,34	25.044,46	840,78	649,45	1279,91	2,36%
	13:00 h	49,73	16.652,23	906,47	723,62	1192,54	2,96%
P. térreo sem árvore	9:00 h	37,14	32.312,36	1.063,15	807,72	1475,58	6,53%
	12:00 h	47,64	27.187,84	1.447,85	1.079,32	2153,23	14,52%
	13:00 h	65,88	25.648,44	2.157,75	1.717,34	2664,08	35,41%
P. superior com árvore	9:00 h	33,62	28.412,42	930,73	676,75	1357,36	4,91%
	12:00 h	55,54	24.570,25	1.341,60	1.018,58	1910,76	12,03%
	15:00 h	86,91	25.981,09	2.270,04	1.758,32	2942,94	36,78%
P. superior sem árvore	9:00 h	39,40	26.250,06	1.012,35	793,39	1329,72	5,08%
	12:00 h	52,05	24.431,14	1.465,38	1.111,71	2027,22	14,95%
	13:00 h	83,19	32.499,28	2.214,13	1.728,72	2795,65	36,11%

Fonte: dados da pesquisa, 2023.

A Figura 76 apresenta os mapas de luminâncias para os cenários da orientação sul. Observa-se, em todos os cenários, a predominância de manchas da cor azul, demonstrando baixos níveis de luminâncias nas superfícies. Visualmente, é possível perceber que a influência da árvore nesta orientação é pouco significativa, apresentando pouca interferência no desempenho da luz natural, independente do horário e/ou pavimento, podendo isso estar associado à não incidência de luz solar direta (mancha solar) nesta orientação.

De acordo com a Tabela 31, as médias das luminâncias para todos os cenários desta orientação são semelhantes, variando de 287,46 cd/m² às 9 horas no pavimento térreo com árvore, até 459,48 cd/m² às 12 horas no pavimento superior sem a presença da árvore. Observa-se, ainda, que a luminância acima de 2000 cd/m² não ultrapassou 2% das luminâncias registradas em nenhum dos cenários desta orientação.

Figura 76 – Imagens HDR e mapas de luminância com cores falsas para a orientação sul



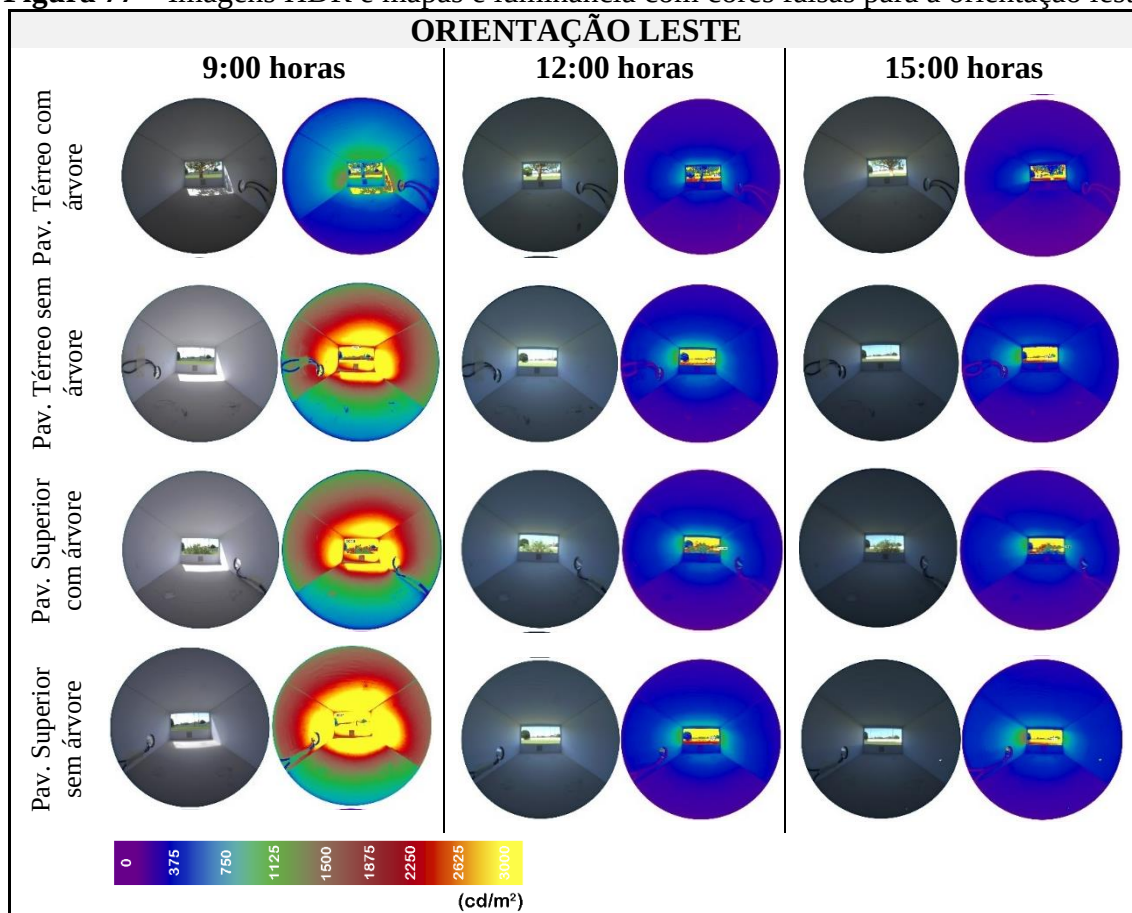
Fonte: dados da pesquisa, 2023.

Tabela 31 – Luminâncias das imagens HDR da orientação sul – Estimativas de localização

ORIENTAÇÃO SUL							
CENÁRIO	HORA	Luminância Mínima	Luminância Máxima	Média	Mediana	Desvio padrão	>2000 cd/m²
P. térreo com árvore	9:00 h	18,29	6910,82	287,46	220,83	309,92	0,95%
	12:00 h	9,60	14774,19	374,57	272,09	631,25	1,47%
	13:00 h	15,26	20629,75	332,64	252,54	665,38	1,10%
P. térreo sem árvore	9:00 h	14,71	13190,22	383,08	288,48	498,77	1,38%
	12:00 h	16,95	12420,02	388,39	291,91	593,97	1,59%
	13:00 h	12,74	22150,17	374,71	268,34	756,90	1,58%
P. superior com árvore	9:00 h	14,89	11946,76	354,65	272,97	448,89	0,53%
	12:00 h	13,70	12690,31	377,96	282,59	575,69	1,46%
	15:00 h	13,60	21658,52	327,94	233,59	703,69	1,16%
P. superior sem árvore	9:00 h	22,81	14248,27	425,12	325,83	544,62	1,36%
	12:00 h	17,10	12703,23	459,48	337,44	675,01	1,88%
	13:00 h	14,57	21568,91	371,37	275,99	731,81	1,45%

Fonte: dados da pesquisa, 2023.

De acordo com a Figura 77, que apresenta os mapas de cores falsas para a orientação leste, exceto no horário da manhã, observa-se predominância de luminâncias mais baixas em todos os cenários. Considerando o grupo das 9 horas, exceto o pavimento térreo com árvore, observa-se predominância das cores mais quentes, indicando níveis mais altos de luminâncias. Neste horário, a presença da árvore no pavimento térreo foi significativa para a redução dos níveis elevados de luminâncias, devido à presença de luz solar direta dentro do ambiente. A luminância média no pavimento térreo com a presença da árvore foi, aproximadamente, quatro vezes menor ($665,95 \text{ cd/m}^2$) que a luminância média nos demais cenários ($2182,31 \text{ cd/m}^2$, $2080,97 \text{ cd/m}^2$ e $2728,94 \text{ cd/m}^2$), considerando o horário das 9 horas. Ainda neste horário, a luminância acima de 2000 cd/m^2 correspondeu a 2,11% no pavimento térreo com árvore e 32,69% sem a presença da árvore (Tabela 32).

Figura 77 – Imagens HDR e mapas e luminância com cores falsas para a orientação leste

Fonte: dados da pesquisa, 2023.

Tabela 32 – Luminâncias das imagens HDR da orientação leste – Estimativas de localização

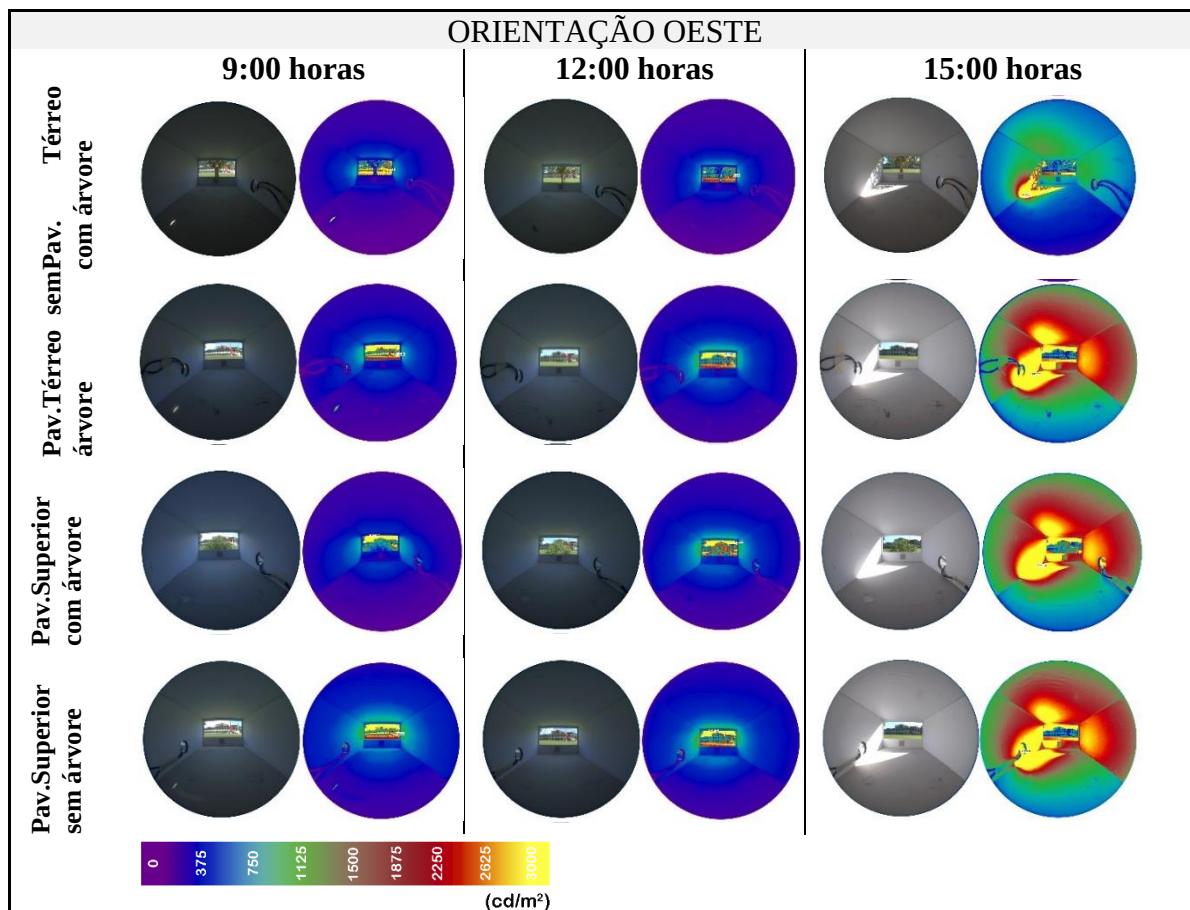
ORIENTAÇÃO LESTE							
CENÁRIO	HORA	Luminância Mínima	Luminância Máxima	Média	Mediana	Desvio padrão	>2000 cd/m ²
P. térreo com árvore	9:00 h	17,50	19871,95	665,95	518,28	1039,71	2,11%
	12:00 h	8,27	10149,03	279,09	204,29	515,89	1,21%
	13:00 h	11,86	18449,44	277,04	174,77	885,94	1,41%
P. térreo sem árvore	9:00 h	87,99	33480,77	2182,31	1592,71	2852,28	32,69%
	12:00 h	14,16	12415,60	420,21	276,77	805,93	2,20%
	13:00 h	16,09	20891,07	445,79	271,75	1233,14	2,35%
P. superior com árvore	9:00 h	80,93	30476,75	2080,97	1536,37	2642,69	29,76%
	12:00 h	14,99	11373,30	362,48	252,84	609,44	1,59%
	15:00 h	13,02	22450,98	387,63	256,18	897,53	1,80%
P. superior sem árvore	9:00 h	85,88	53267,82	2728,94	1866,68	4071,98	43,55%
	12:00 h	16,29	11552,66	414,35	279,75	742,26	2,19%
	13:00 h	22,389	21837,16	502,62	314,29	1274,65	2,35%

Fonte: dados da pesquisa, 2023.

A orientação oeste tem comportamento semelhante à orientação leste, porém os maiores níveis de luminância são registrados às 15 horas. A presença da árvore no pavimento térreo reduziu a luminância média de 2172,35cd/m² para 842,51 cd/m². No período mais crítico para

esta orientação (15 horas), a luminância acima de 2000 cd/m² representou 3,45% no pavimento térreo com a presença da árvore e 31,76% sem a presença da árvore (Figura 78 e Tabela 33).

Figura 78 – Imagens HDR e mapas de luminância com cores falsas para a orientação oeste



Fonte: dados da pesquisa, 2023.

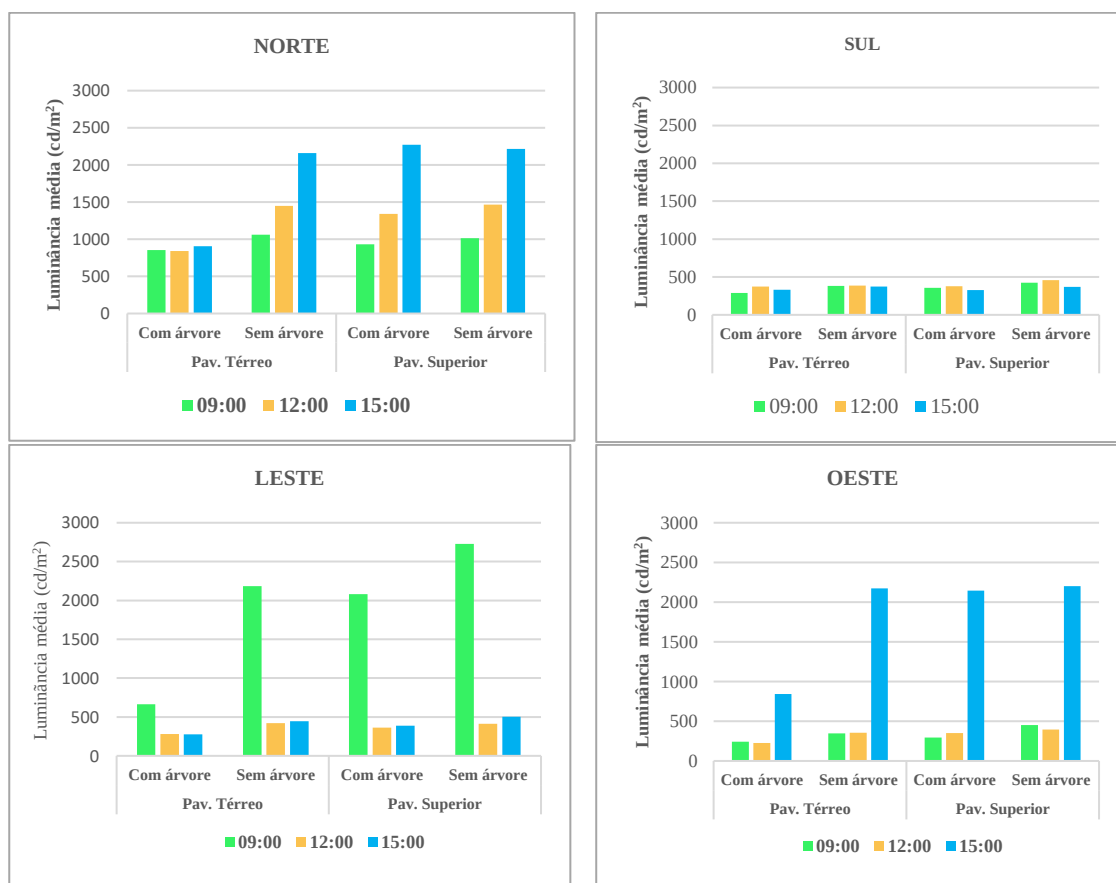
Tabela 33 – Luminâncias das imagens HDR da orientação oeste – Estimativas de localização

ORIENTAÇÃO OESTE							
CENÁRIO	HORA	Luminância Mínima	Luminância Máxima	Média	Mediana	Desvio padrão	>2000 cd/m ²
P. térreo com árvore	9:00 h	11,64	7674,62	243,76	179,25	393,45	1,14%
	12:00 h	6,53	5515,44	227,84	178,58	255,28	0,71%
	13:00 h	31,25	26044,5	842,51	628,66	1386,56	3,45%
P. térreo sem árvore	9:00 h	14,34	15789,934	348,674	245,214	690,474	1,58%
	12:00 h	12,99	11692,48	355,18	259,37	532,98	1,47%
	13:00 h	73,76	29662,05	2172,35	1578,80	3187,17	31,76%
P. superior com árvore	9:00 h	12,58	13403,89	296,47	198,45	680,64	0,90%
	12:00 h	11,24	14281,764	351,958	259,56	531,72	1,14%
	15:00 h	92,424	29369,39	2145,58	1498,44	3195,08	30,02%
P. superior sem árvore	9:00 h	20,25	16254,38	452,81	326,47	793,44	1,80%
	12:00 h	16,14	13934,79	394,08	292,06	565,66	1,47%
	13:00 h	62,28	55948,03	2200,41	1563,05	3354,92	32,05%

Fonte: dados da pesquisa, 2023.

A Figura 79 apresenta as luminâncias médias dos cenários considerando as quatro orientações. Na orientação norte, a presença da árvore no pavimento térreo demonstrou maior impacto no período da tarde (15 horas), quando a luminância média reduziu 57,9%. Na orientação sul, as luminâncias médias mantiveram comportamento semelhante em todos os cenários e horários. Em leste, a presença da árvore teve maior impacto no turno da manhã (9 horas). No pavimento térreo, a presença da árvore conseguiu reduzir os níveis de luminâncias em 69,48%, e 23,74% no pavimento superior. No comportamento da orientação oeste, a presença da árvore teve maior impacto no turno da tarde (15 horas). No pavimento térreo, a luminância média reduziu 61,22% com a presença da árvore. No pavimento superior, não se observou redução significativa.

Figura 79 – Comparação entre as luminâncias médias dos cenários



Fonte: dados da pesquisa, 2023.

Os resultados dos níveis de luminâncias analisados a partir das imagens HDR e os mapas de cores falsas indicam que a presença da árvore tem maior influência no pavimento térreo. Os resultados indicam, ainda, que o maior impacto da árvore na luminância ocorre quando há incidência direta da luz solar. Nos casos em que a iluminação natural é indireta, que é o caso da orientação sul, a presença da árvore não representa alterações significativas nas luminâncias das

superfícies.

Cinco métricas de ofuscamento foram extraídas a partir das imagens HDR: Probabilidade de ofuscamento da luz do dia (DGP), Índice de ofuscamento da luz do dia (DGI), Classificação unificada de ofuscamento (UGR), Probabilidade de conforto visual (VCP) e Índice de ofuscamento CIE (CGI). No entanto, apenas o DGP foi considerado para análise. As demais métricas têm limitações, considerando a metodologia proposta por este estudo. Os resultados de cada uma destas métricas estão apresentados no Apêndice B.

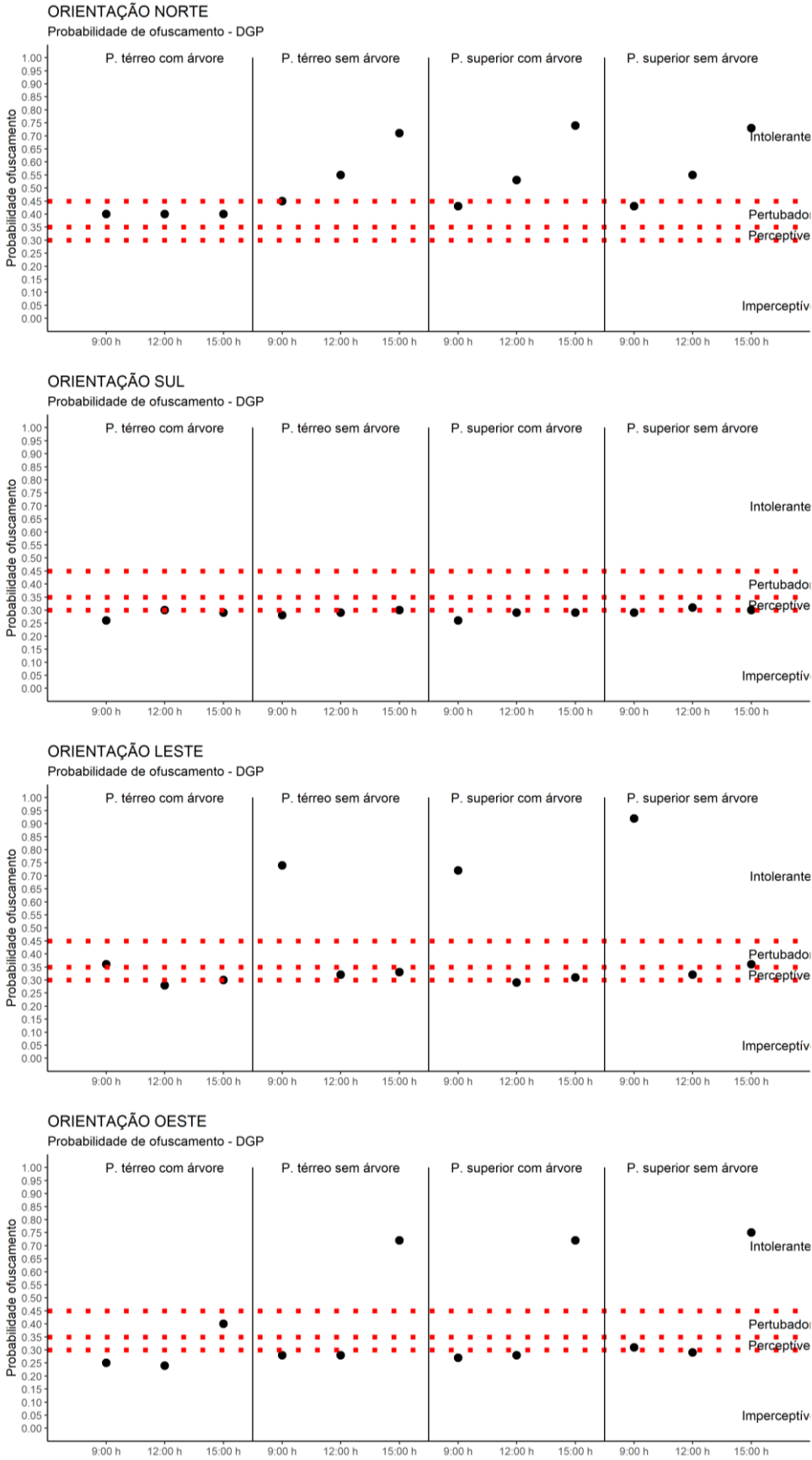
4.3.1.3.1 Probabilidade de ofuscamento – DGP

O DGP (*Discomfort Glare Probability*) extraído de cada cena também foi obtido por meio da análise das imagens HDR, com a metodologia descrita no item 3.2.3. Os valores do DGP foram comparados com os valores dos limiares encontrados na literatura (REINHART; WIENOLD, 2011) para avaliação da probabilidade de ofuscamento. De acordo com os supracitados autores, o brilho é considerado imperceptível para DGPs menores que 0,30, tornando-se perceptível para DGPs de 0,30–0,35, perturbador para DGPs de 0,35–0,45 e intolerável para valores de DGPs acima de 0,45. Durante a aquisição das fotografias, o ponto de medição não foi afetado pela luz solar direta. Ou seja: o sol não é visível do ponto extremo adjacente à janela, o que tornou possível a aplicação do método DGP.

Os gráficos da Figura 80 apresentam os DGPs de cada cenário estudado, considerando diferentes posições solares (9 horas, meio-dia e 15 horas) do dia 25 de julho de 2022. Observa-se que, na orientação norte, apenas no pavimento térreo com a presença da árvore, os valores de DGPs para todos os horários se enquadram na classificação de ofuscamento perturbador. Nos demais cenários, a classificação se enquadra entre perturbador e intolerável, mesmo ao meio-dia, quando o sol está alto. Em todos os cenários da orientação sul, a classificação de ofuscamento é imperceptível e perceptível em alguns casos.

Na orientação leste, apenas no horário da manhã, o ofuscamento foi considerado perturbador no pavimento térreo com árvore e intolerante nos demais cenários. Na orientação oeste, apenas no horário da tarde, o ofuscamento foi considerado perturbador no pavimento térreo com árvore e intolerante nos demais cenários. Nas duas orientações, as demais situações apresentaram ofuscamento imperceptível ou perceptível.

Figura 80 – Valores de DGP em três momentos do dia e para cada cenário



Fonte: dados da pesquisa, 2023.

Contudo, observa-se que a presença da árvore tem maior efeito na probabilidade de ofuscamento, principalmente, no pavimento térreo nos horários em que há presença da mancha solar dentro do ambiente. Na orientação sul, onde não há incidência solar em nenhum dos horários registrados (ver Figura 76), os DGPs se mantiveram com pouca variação entre as situações com e sem a presença da árvore em ambos os pavimentos.

De acordo com a Figura 75, que corresponde às imagens da orientação norte, observa-se incidência solar direta nos três horários do dia, no entanto, as diferenças mais significativas ocorreram nos horários de meio-dia e 15 horas no pavimento térreo. No período da tarde, neste pavimento, a probabilidade de ofuscamento caiu de aproximadamente 75%, sem a presença da árvore, para aproximadamente 40%, considerando a presença da árvore.

Na orientação leste, como já esperado, a diferença entre os DGPs foi mais significativa no período da manhã. No pavimento térreo, a probabilidade de ofuscamento sem a árvore é de aproximadamente 75%; com a presença da árvore, esta probabilidade é de aproximadamente 35%. No pavimento superior, observa-se uma diferença menos significativa entre as situações sem e com a presença da árvore: aproximadamente, 90% e 70% de probabilidade de ofuscamento, respectivamente. No entanto, esta diferença não muda o enquadramento do ofuscamento como intolerante em ambas as situações.

Para oeste, a maior diferença entre os DGPs ocorreu no período da tarde no pavimento térreo, onde, sem a presença da árvore, a probabilidade de ofuscamento foi de, aproximadamente, 75%, enquanto, com a presença da árvore, esta probabilidade passa a ser aproximadamente 40%. No pavimento superior, não ocorreram diferenças significativas entre as situações com e sem árvore.

4.3.2 ANÁLISE ANUAL DA ILUMINÂNCIA NATURAL – SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

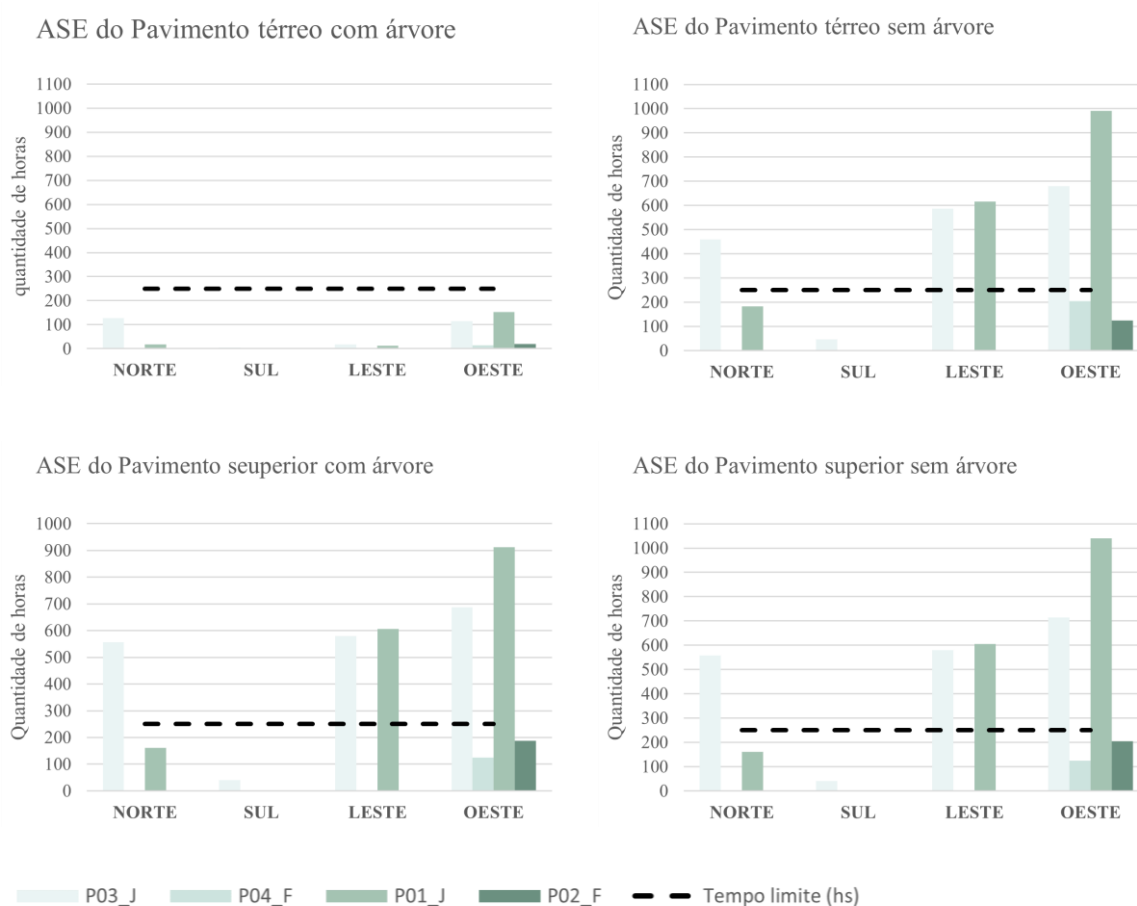
4.3.2.1 Disponibilidade de iluminação natural – Iluminância horizontal

A simulação da iluminância horizontal dos cenários ocorreu conforme descrito no item 3.4. Assim como ocorreu com os dados de medição sob céu real, o desempenho lumínico das simulações também são avaliados conforme as seguintes métricas: sDA, ASE e UDI. Estas análises são realizadas considerando cada ponto de registro individualmente, com e sem a presença da árvore, permitindo uma avaliação comparativa entre as duas situações.

A Autonomia Espacial da Iluminação Natural (sDA_{300/50%}), com 300 lux como limite

mínimo de iluminância e para 50% do tempo, é de 100% para todos os cenários analisados. Os resultados para a Exposição Anual à Luz do Sol ($ASE_{1000/250h}$) podem ser visualizados na Figura 81. Observa-se que a orientação sul apresentou menos de 100 horas com iluminância acima de 1000 lux em todos os pavimentos. Nas orientações leste e oeste, os pontos próximos à janela apresentaram níveis de iluminância acima de 1000 lux por mais de 250 horas. Na orientação norte, apenas um dos pontos próximos à janela (P03_J) extrapolou as 250 horas com iluminância acima de 1000 lux. Nota-se, ainda, que a presença da árvore no pavimento térreo teve efeito significativo no ASE, e, em nenhuma orientação, os níveis de iluminância acima de 1000 lux extrapolou 200 horas.

Figura 81 – Exposição Anual à Luz do Sol (ASE) para cada ponto simulado



Fonte: dados da pesquisa, 2023.

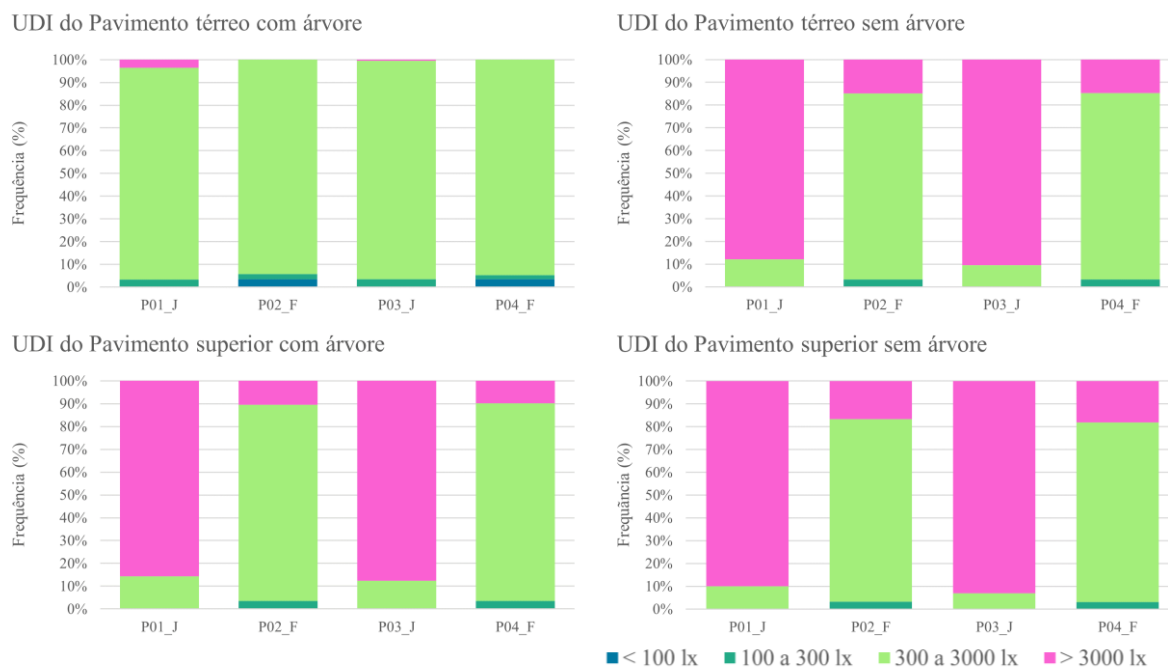
A Iluminância Útil da Luz do Dia (UDI) foi analisada para cada ponto de medição de cada cenário estudado. As Figuras 82 a 85 apresentam os resultados de todas as orientações. O comportamento da distribuição da frequência da iluminância nos quatro cenários estudados se deu de forma semelhante entre as orientações. Desta forma, a descrição que segue corresponde

às orientações norte, sul, leste e oeste.

O pavimento térreo com árvore apresentou predominância de níveis de iluminância entre 300 e 3000 lux. Já no pavimento térreo sem a presença da árvore, na área próxima à janela (P01_J e P03_J), a maior frequência da iluminância ocorreu para valores acima de 3000 lux. Na área mais próxima ao fundo (P02_F e P04_F) do ambiente, a maior frequência ocorreu entre 300 e 3000 lux.

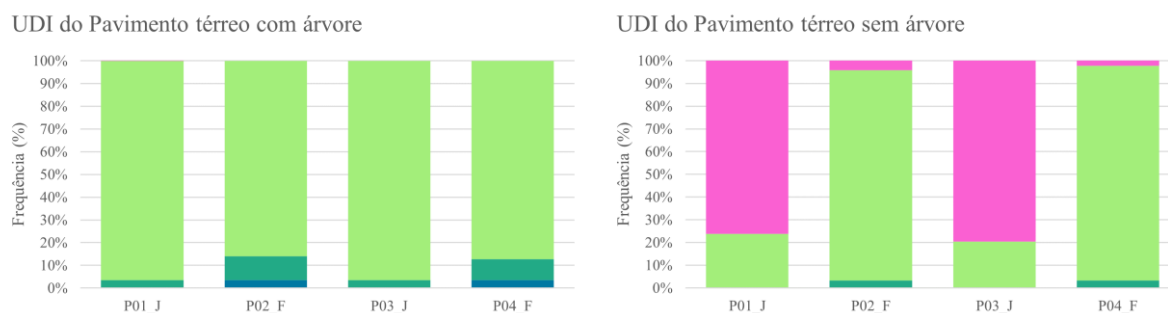
O pavimento superior, com e sem a presença da árvore, apresenta comportamento semelhante entre si. Ou seja: para este pavimento, a presença da árvore não exerceu influência significativa nos níveis de iluminância.

Figura 82 – UDI para cada ponto simulado – orientação norte

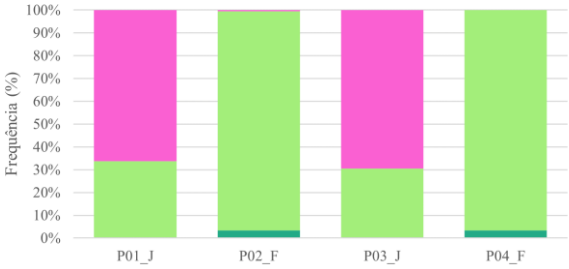


Fonte: dados da pesquisa, 2023.

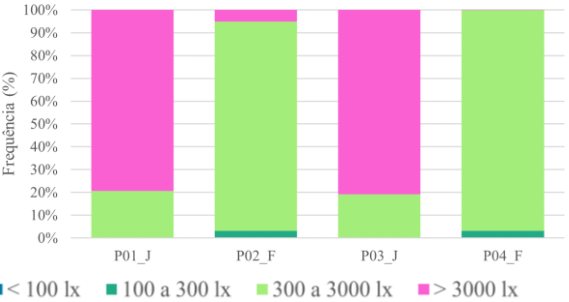
Figura 83 – UDI para cada ponto simulado – orientação sul



UDI do Pavimento superior com árvore



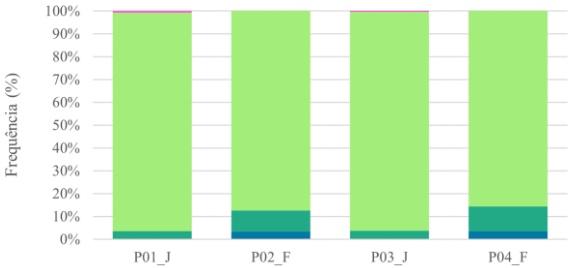
UDI do Pavimento superior sem árvore



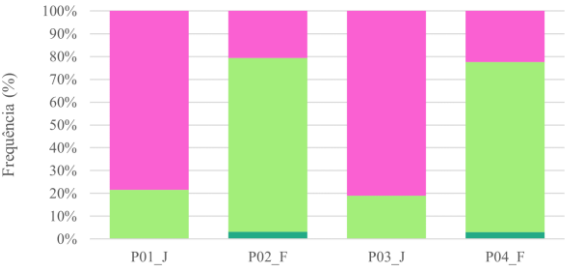
Fonte: dados da pesquisa, 2023.

Figura 84 – UDI para cada ponto simulado – orientação leste

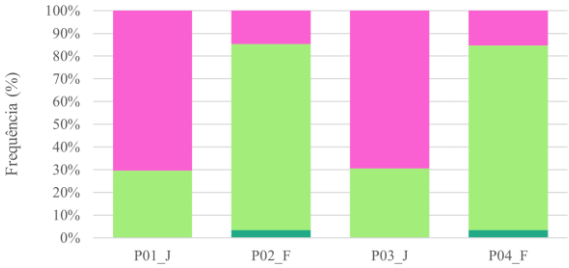
UDI do Pavimento térreo com árvore



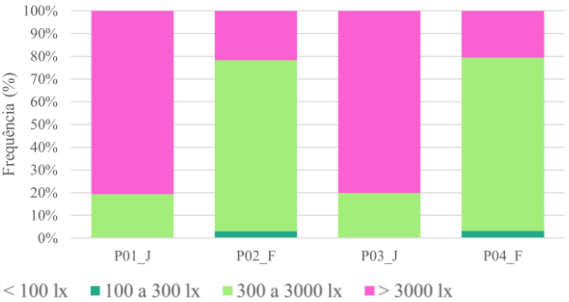
UDI do Pavimento térreo sem árvore



UDI do Pavimento superior com árvore



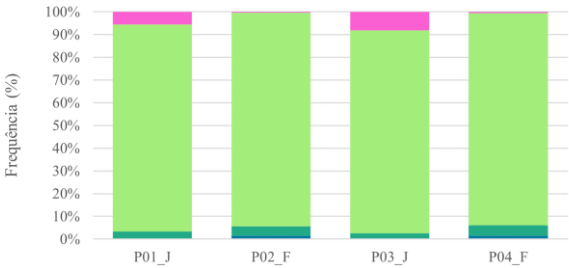
UDI do Pavimento superior sem árvore



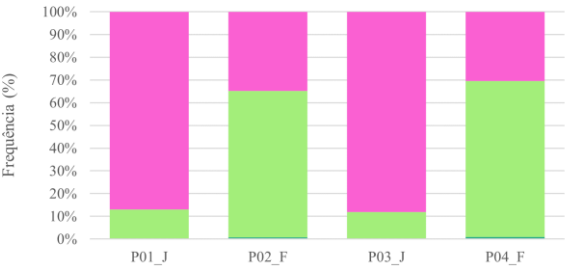
Fonte: dados da pesquisa, 2023.

Figura 31 – UDI para cada ponto simulado – orientação oeste

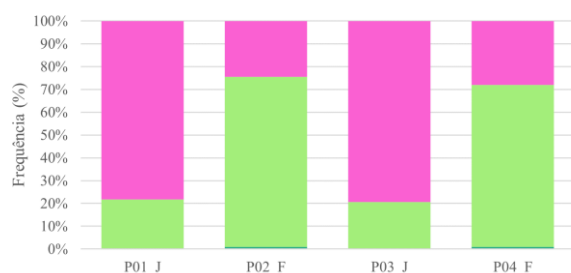
UDI do Pavimento térreo com árvore



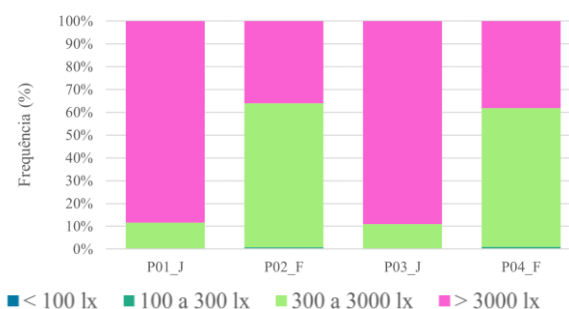
UDI do Pavimento térreo sem árvore



UDI do Pavimento superior com árvore



UDI do Pavimento superior sem árvore

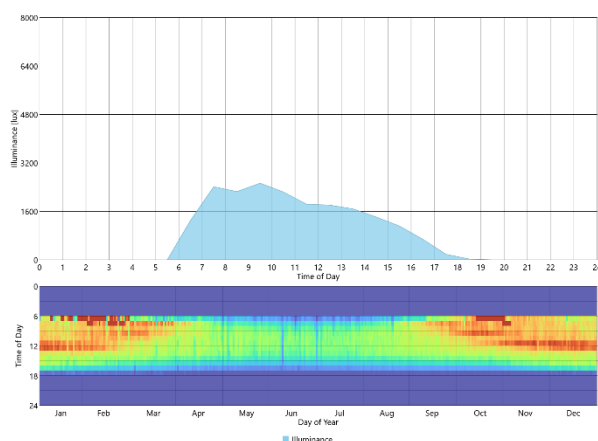


Fonte: dados da pesquisa, 2023.

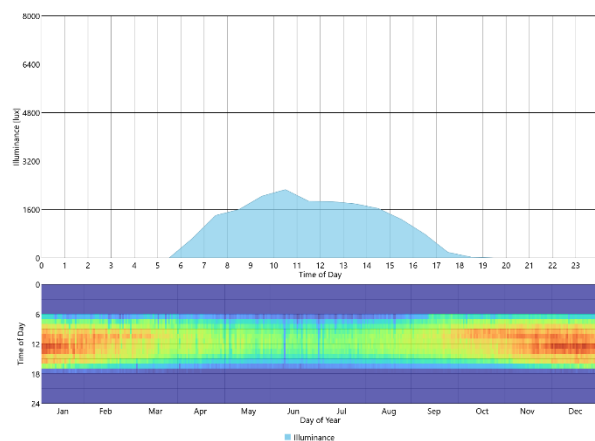
As Figuras 86 e 87 mostram os mapas de iluminância temporal para os pontos do pavimento térreo com e sem a presença da árvore correspondente à orientação sul. Observa-se que, na condição sem árvore, os pontos P01 e P03 próximos à janela registraram iluminância extrema durante todo o ano e em quase todas as horas do dia (6 às 18 horas), apresentando uma ligeira redução nos meses mais próximos ao solstício de inverno. Já considerando a presença da árvore, observam-se níveis de iluminância acima de 3000 lux apenas em alguns horários dos dias mais próximos ao solstício de verão.

Os pontos P02 e P04 (mais próximos ao fundo do ambiente) também apresentaram diferenças significativas entre as condições com e sem árvore. Considerando a presença da árvore, observa-se que, em nenhum momento, a iluminância atingiu 3000 lux, e, em poucos momentos dos dias próximos ao solstício de inverno, a iluminância foi inferior a 100 lux. Sem a presença da árvore, o pavimento apresentou iluminâncias acima de 3000 lux nos meses mais próximos ao solstício de verão.

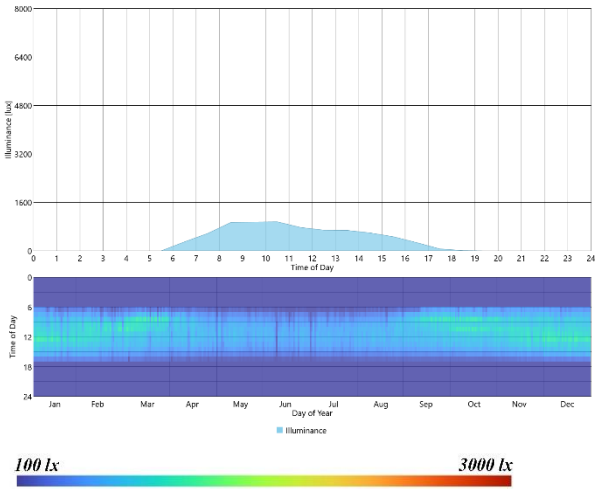
Figura 86 – Mapas de iluminância temporal do pavimento térreo com árvore: orientação sul
P01 - Janela



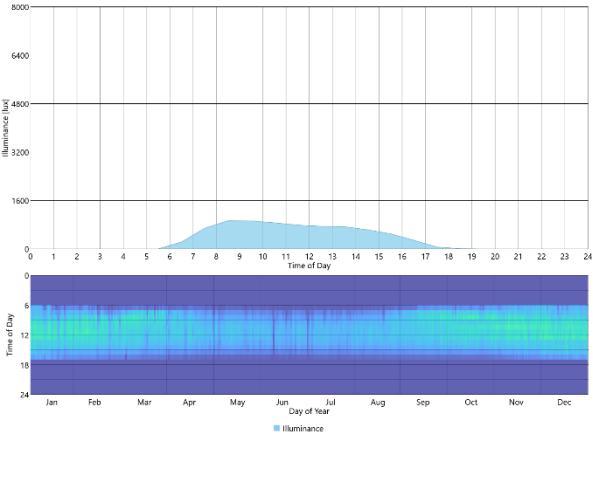
P03 - Janela



P02 – Fundo



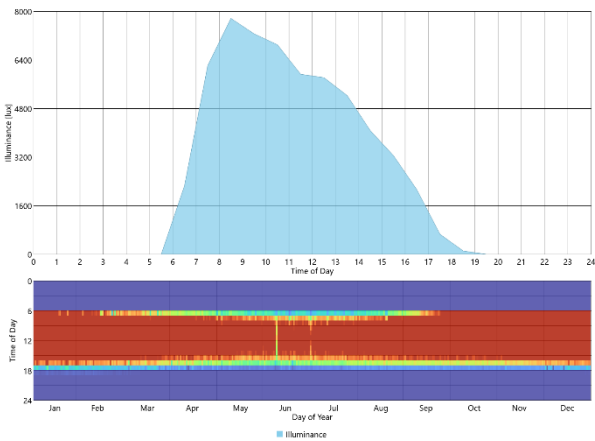
P04 -Fundo



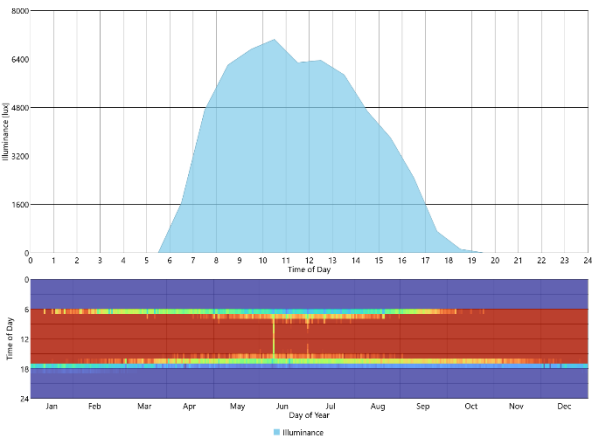
Fonte: dados da pesquisa, 2023.

Figura 32 – Mapas de iluminância temporal do pavimento térreo sem árvore – orientação sul

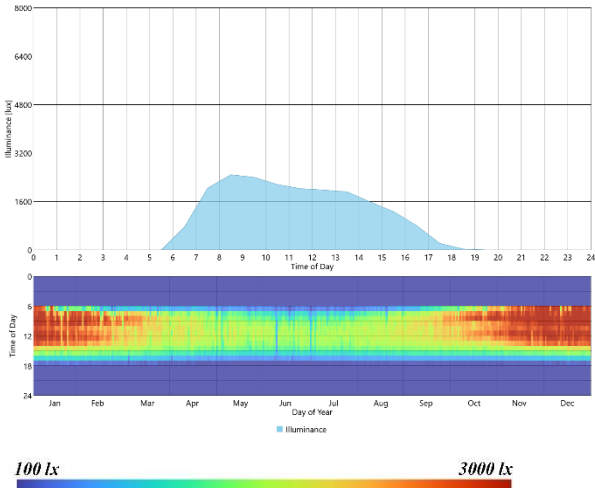
P01 - Janela



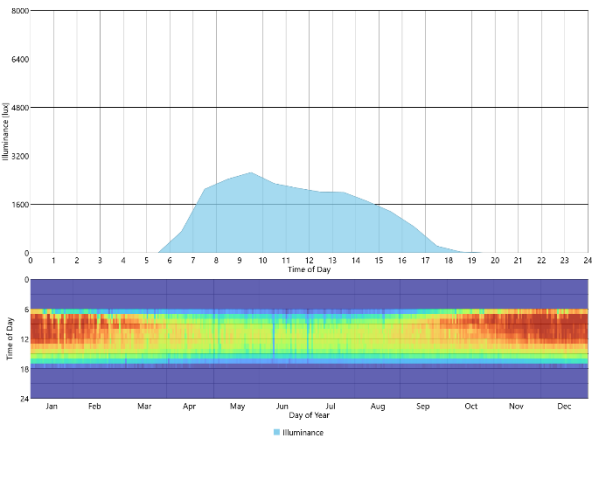
P03 - Janela



P02 – Fundo



P04 -Fundo



Fonte: dados da pesquisa, 2023.

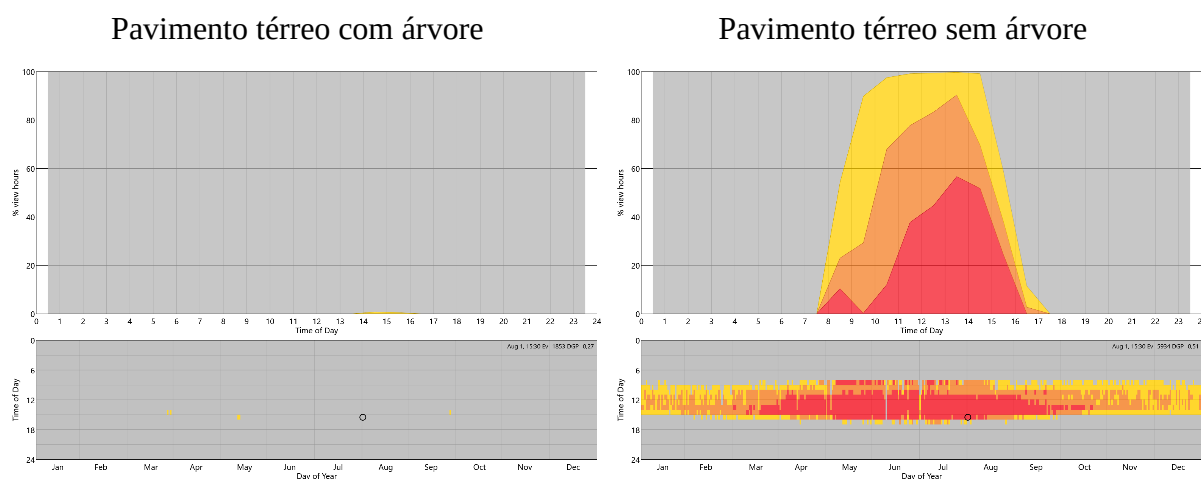
Comparando as Figuras 86 e 87, observam-se diferenças significativas entre a presença ou não da árvore com, principalmente, redução da iluminância excessiva ao longo do ano, que ocorreu principalmente na porção do ambiente mais próxima à janela. Os resultados dos mapas de iluminâncias das demais orientações apresentam comportamento semelhante, resguardando as particularidades de cada orientação. Estes mapas podem ser visualizados no Apêndice C.

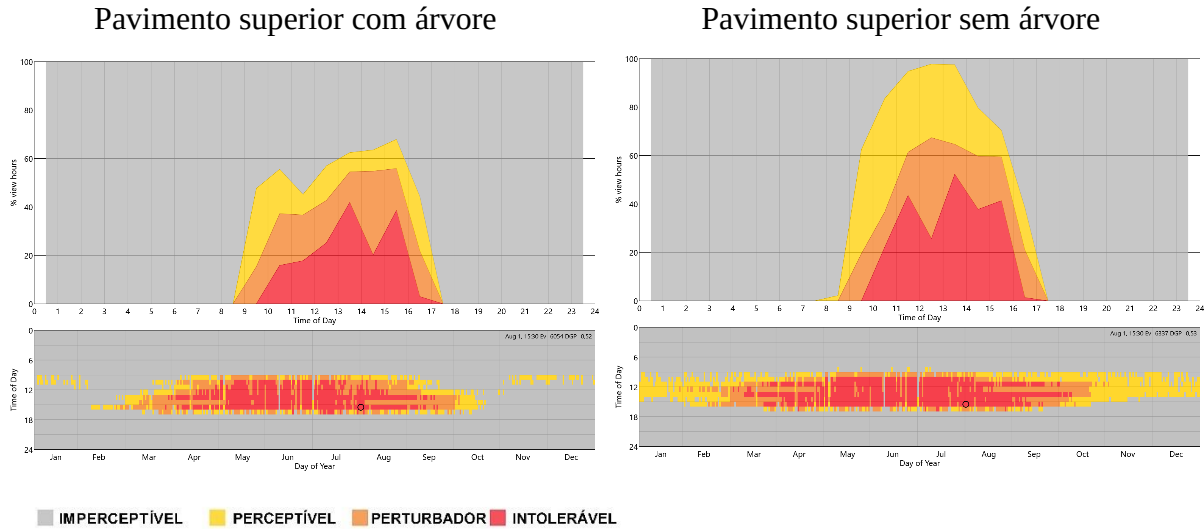
4.3.2.2 Probabilidade de ofuscamento – DGP

Os resultados apresentados a seguir são baseados nos procedimentos metodológicos descritos no item 3.4. Nas figuras 88 a 91, são apresentados os mapas de probabilidade de ofuscamento temporal agrupados por hora do dia e dia do ano para cada cenário.

Observa-se que, para todas as orientações, o pavimento térreo com a presença da árvore apresenta ofuscamento classificado como imperceptível em praticamente todos os horários do dia e dias do ano. Na orientação norte, há ocorrência de ofuscamento perturbador e intolerante, principalmente no período da tarde, nos meses mais próximos ao solstício de inverno. Nesta mesma orientação, o pavimento superior com árvore demonstrou redução na ocorrência de ofuscamento perturbador e intolerável em relação à condição sem árvore.

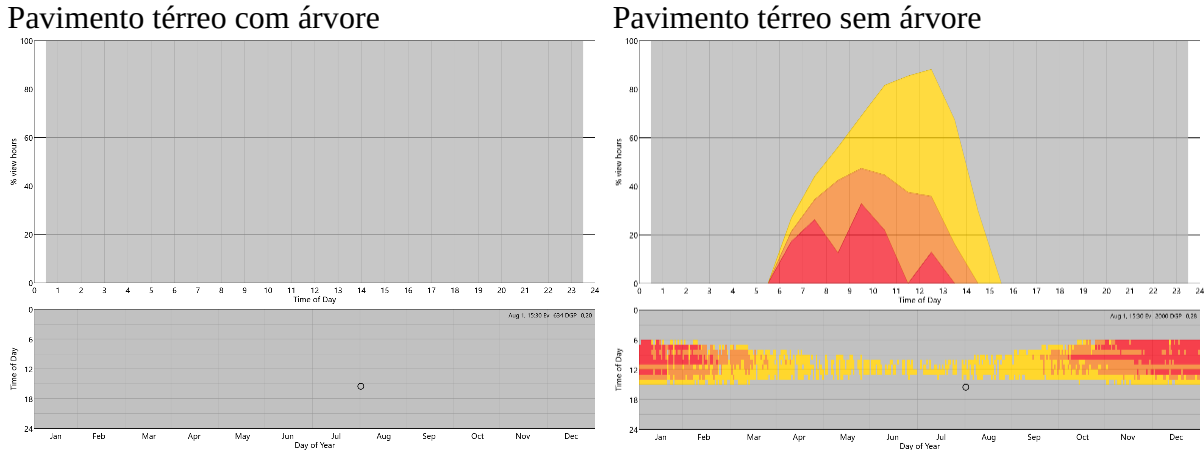
Figura 88 – Mapas de probabilidade de ofuscamento temporal – orientação norte



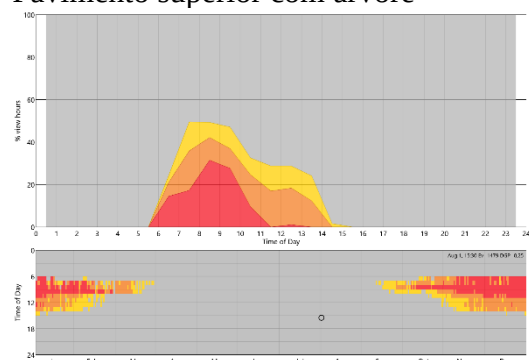


A Figura 89 apresenta os mapas de probabilidade de ofuscamento temporal para a orientação sul, na qual a ocorrência de ofuscamento acontece, principalmente, nos meses próximos ao solstício de verão, no período da manhã. O pavimento superior apresentou diferença do ofuscamento perceptível entre as situações com e sem árvore. Já o ofuscamento considerado intolerável apresentou aumento na situação com árvore em relação à situação sem árvore.

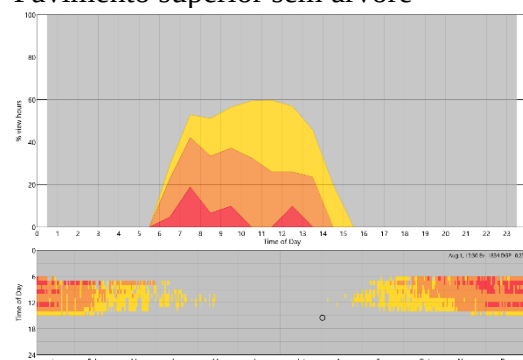
Figura 89 – Mapas de probabilidade de ofuscamento temporal – orientação sul



Pavimento superior com árvore



Pavimento superior sem árvore



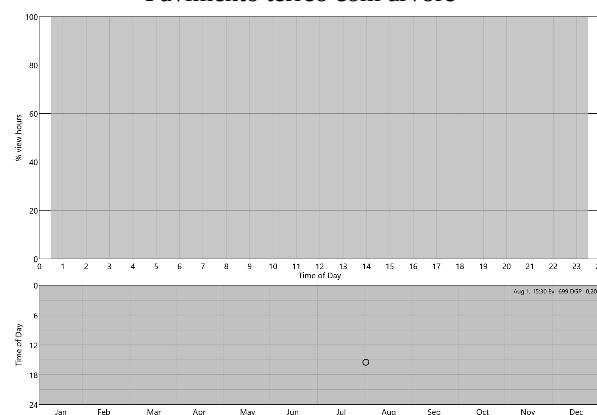
■ IMPERCEPTÍVEL ■ PERCEPTÍVEL ■ PERTURBADOR ■ INTOLERÁVEL

Fonte: dados da pesquisa, 2023.

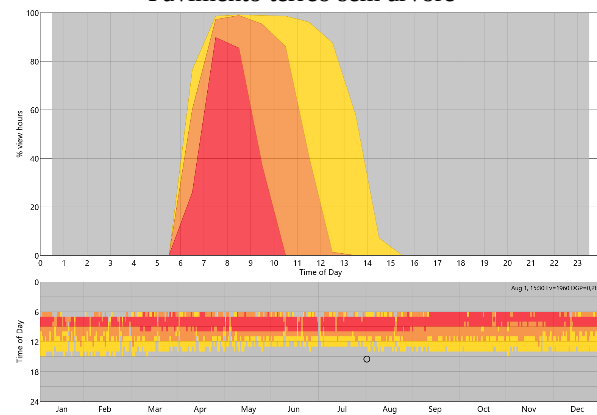
Na orientação leste (Figura 90), a ocorrência de ofuscamento perturbador e intolerável é, predominantemente, pela manhã e estende-se durante todo o ano. No pavimento superior com árvore, observa-se uma pequena redução da ocorrência de ofuscamento.

Figura 90 – Mapas de probabilidade de ofuscamento temporal – orientação leste

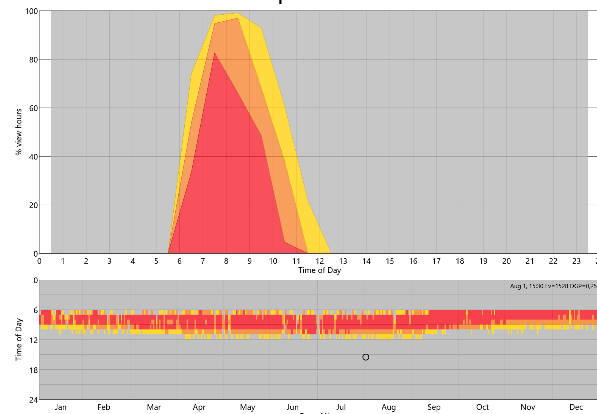
Pavimento térreo com árvore



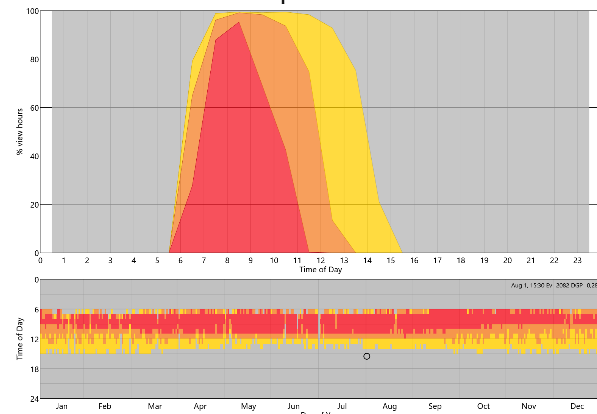
Pavimento térreo sem árvore



Pavimento superior com árvore



Pavimento superior sem árvore

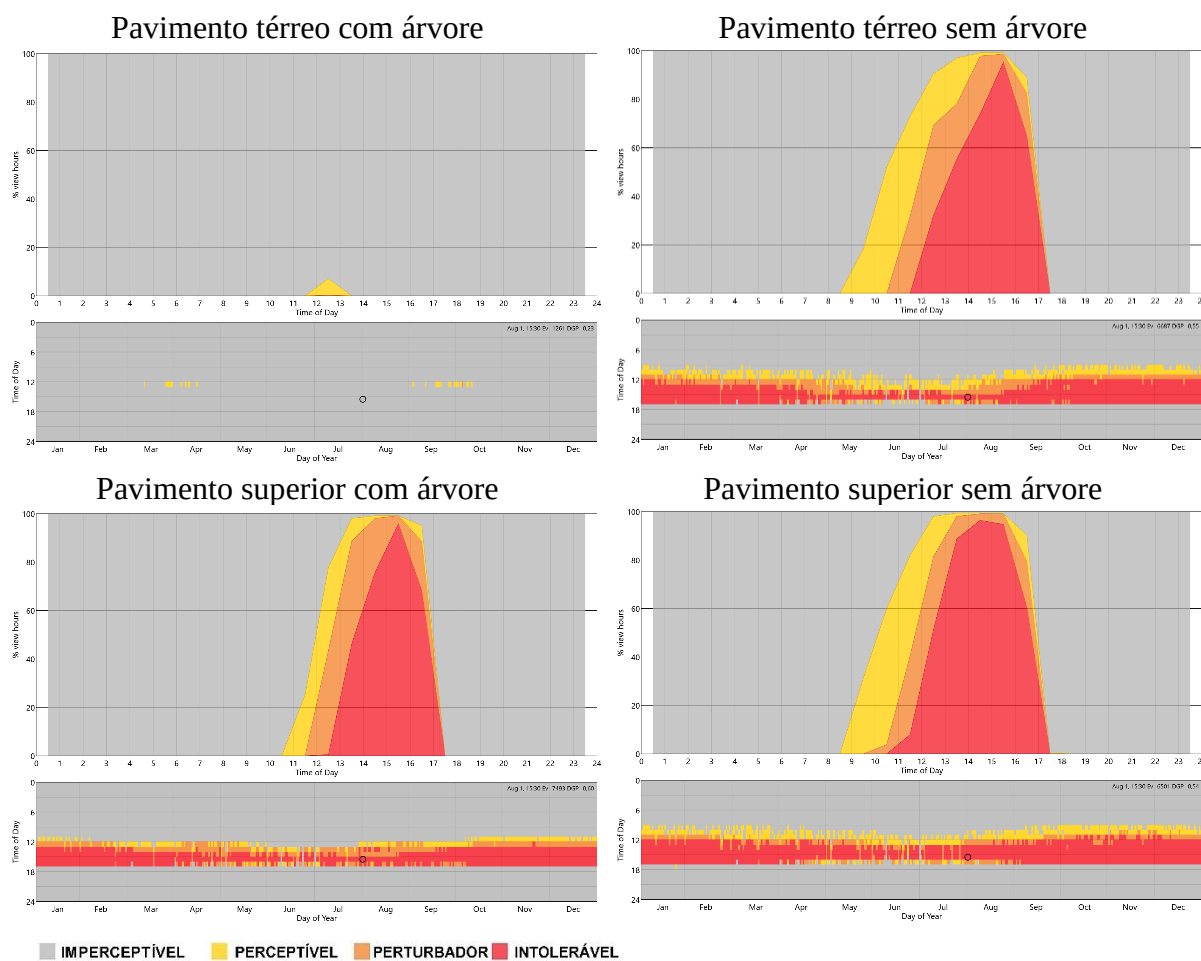


■ IMPERCEPTÍVEL ■ PERCEPTÍVEL ■ PERTURBADOR ■ INTOLERÁVEL

Fonte: dados da pesquisa, 2023.

A orientação oeste (Figura 91) apresenta comportamento semelhante a leste, porém a ocorrência de ofuscamento perturbador e intolerante é predominante no período da tarde, estendendo-se durante todo o ano. Nota-se ligeira redução da ocorrência de ofuscamento perceptível, perturbador e intolerável no pavimento superior com árvore em relação à situação sem árvore.

Figura 91 – Mapas de probabilidade de ofuscamento temporal – orientação oeste



Fonte: dados da pesquisa, 2023.

A Figura 92 apresenta a distribuição da probabilidade de ofuscamento entre 6 horas e 30 minutos e 17 horas e 30 minutos durante todo o ano. A Tabela 34 apresenta as estimativas de localização dos valores de DGP. Observa-se que os cenários estudados têm comportamento semelhante entre as orientações.

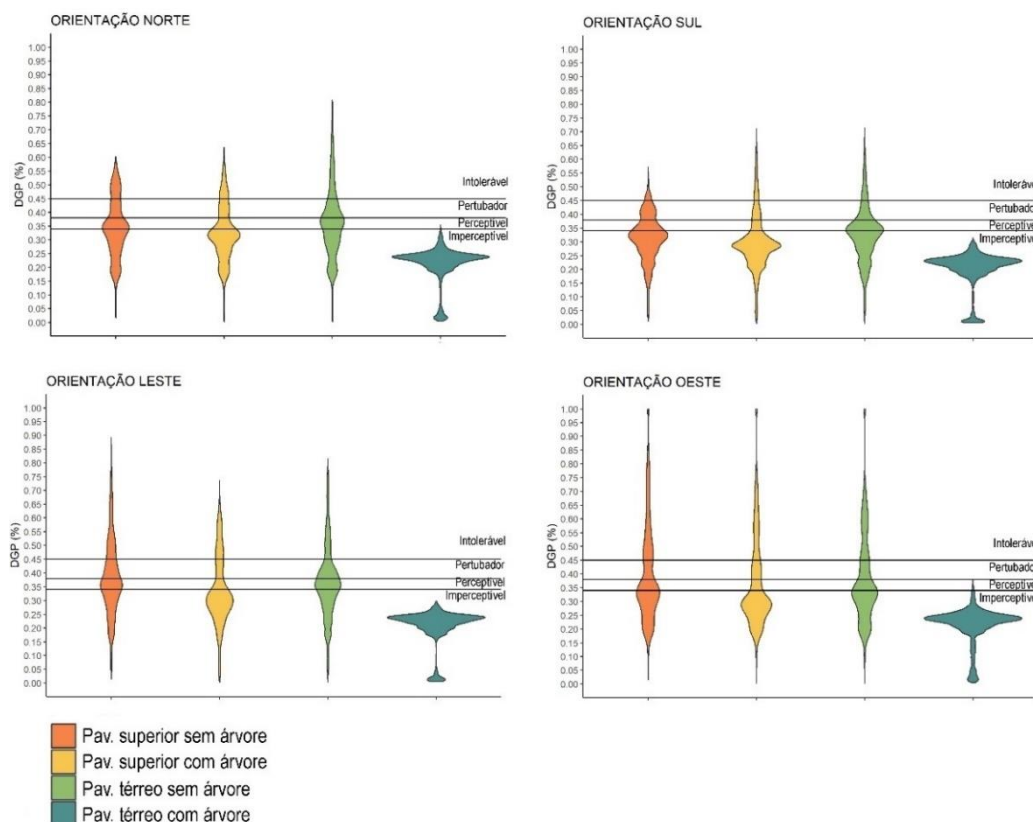
Entre os cenários do pavimento térreo com e sem a presença da árvore, observa-se, em todas as orientações, diferenças significativas nos níveis de ofuscamento. Na orientação norte, a condição sem árvore apresentou 75% dos registros de DGP classificados entre imperceptível e perturbador. Já na condição com árvore, 75% dos dados foram classificados como

imperceptível. As medianas para cada situação foram de 0,23 e 0,36, com árvore e sem árvore, respectivamente.

A condição sem árvore da orientação sul registrou 75% do DGP com classificação entre imperceptível e perceptível, com mediana de 0,33. Na condição com árvore, todo o DGP registrado foi classificado como imperceptível, com mediana de 0,22. Na orientação leste, a ocorrência de ofuscamento para a condição sem árvore foi classificada entre imperceptível e perturbador e, para a condição com árvore, foi classificada como imperceptível para 75% dos registros. As medianas para cada situação foram de 0,23 com árvore e 0,36 sem árvore. Para a orientação oeste, na situação sem árvore, 75% da ocorrência de ofuscamento foi classificada como imperceptível e intolerável, com mediana de 0,34. Considerando a presença da árvore, 75% dos registros foram classificados como imperceptível, com mediana de 0,23.

Considerando os cenários com e sem a presença da árvore do pavimento superior, diferentemente do que ocorreu no pavimento térreo, observam-se poucas diferenças nos níveis de ofuscamento entre as situações com e sem a presença da árvore. Na orientação norte, a ocorrência de ofuscamento obteve classificação entre imperceptível e perturbador para 75% dos registros em ambas as situações. Ainda nesta orientação, as medianas observadas foram de 0,32 com árvore e 0,34 para a situação sem árvore.

Na orientação sul, 75% da ocorrência de ofuscamento foi classificada como imperceptível e perceptível com medianas de 0,29 e 0,32 para as condições com e sem a presença da árvore, respectivamente. Considerando a orientação leste, a condição sem árvore apresentou 75% do ofuscamento classificado entre imperceptível e intolerável com mediana de 0,37. Com a presença da árvore, essa classificação ficou entre imperceptível e perturbador e mediana de 0,31. Em oeste, os níveis de ofuscamento atingiram as maiores amplitudes. Sem a presença da árvore, 75% dos registros se concentraram nas faixas de classificação entre imperceptível e intolerável. Com a presença da árvore, os registros se concentraram entre imperceptível e perturbador. As medianas da probabilidade de ofuscamento foram de 0,31 e 0,35 para as condições com e sem árvore, respectivamente.

Figura 92 – Distribuição do DGP simulado entre 6h30min e 17h30min durante todo o ano

Fonte: dados da pesquisa, 2023.

Tabela 34 – Estimativas de localização dos valores de DGP

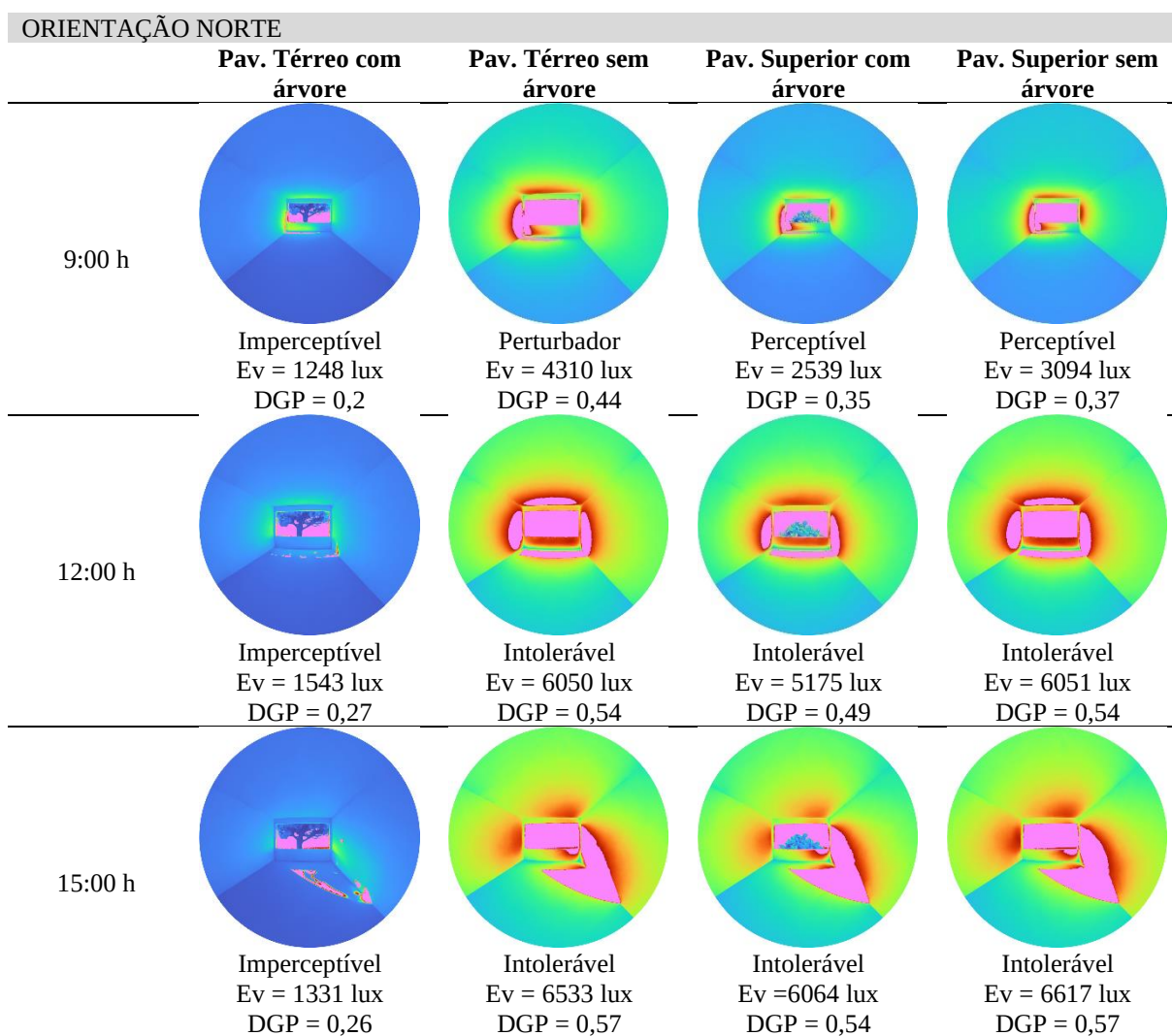
NORTE						
	Mín.	1º Quartil	Mediana	Média	3º Quartil	Máx.
Pav. térreo com árvore	0	0,21	0,23	0,21	0,24	0,35
Pav. térreo sem árvore	0	0,29	0,36	0,37	0,43	0,81
Pav. superior com árvore	0	0,26	0,32	0,33	0,39	0,64
Pav. superior sem árvore	0,02	0,28	0,34	0,35	0,42	0,60
SUL						
	Mín.	1º Quartil	Mediana	Média	3º Quartil	Máx.
Pav. térreo com árvore	0,005	0,19	0,22	0,20	0,24	0,31
Pav. térreo sem árvore	0,003	0,27	0,33	0,33	0,37	0,71
Pav. superior com árvore	0,003	0,24	0,29	0,30	0,33	0,71
Pav. superior sem árvore	0,011	0,27	0,32	0,31	0,36	0,57
LESTE						
	Mín.	1º Quartil	Mediana	Média	3º Quartil	Máx.
Pav. térreo com árvore	0,005	0,20	0,23	0,21	0,24	0,30
Pav. térreo sem árvore	0,003	0,29	0,36	0,37	0,42	0,82
Pav. superior com árvore	0,003	0,26	0,31	0,34	0,41	0,74
Pav. superior sem árvore	0,014	0,30	0,37	0,38	0,46	0,89
OESTE						
	Mín.	1º Quartil	Mediana	Média	3º Quartil	Máx.
Pav. térreo com árvore	0,005	0,21	0,23	0,21	0,25	0,38
Pav. térreo sem árvore	0,003	0,28	0,34	0,38	0,46	1
Pav. superior com árvore	0,003	0,26	0,31	0,36	0,44	1
Pav. superior sem árvore	0,013	0,29	0,35	0,40	0,49	1

Fonte: dados da pesquisa, 2023.

As Figuras 93 a 96 apresentam os resultados da simulação das cenas estudadas com os valores de DGP, iluminância vertical e os mapas de cores falsas para o dia 25 de julho. Esta data corresponde ao dia da realização das medições sob céu real descrita no item 3.2.

Observa-se que, na orientação norte (Figura 93), o pavimento térreo com árvore apresentou ofuscamento imperceptível para os três horários. No pavimento térreo sem árvore, o ofuscamento foi classificado como perturbador e intolerável. As situações com árvore e sem árvore do pavimento superior apresentaram a mesma classificação de ofuscamento, perceptível pela manhã e intolerável ao meio-dia e no período da tarde. No entanto, nota-se que a presença da árvore exerceu influência na redução da iluminância vertical e, consequentemente, no DGP, porém não o suficiente para que houvesse mudança de classificação.

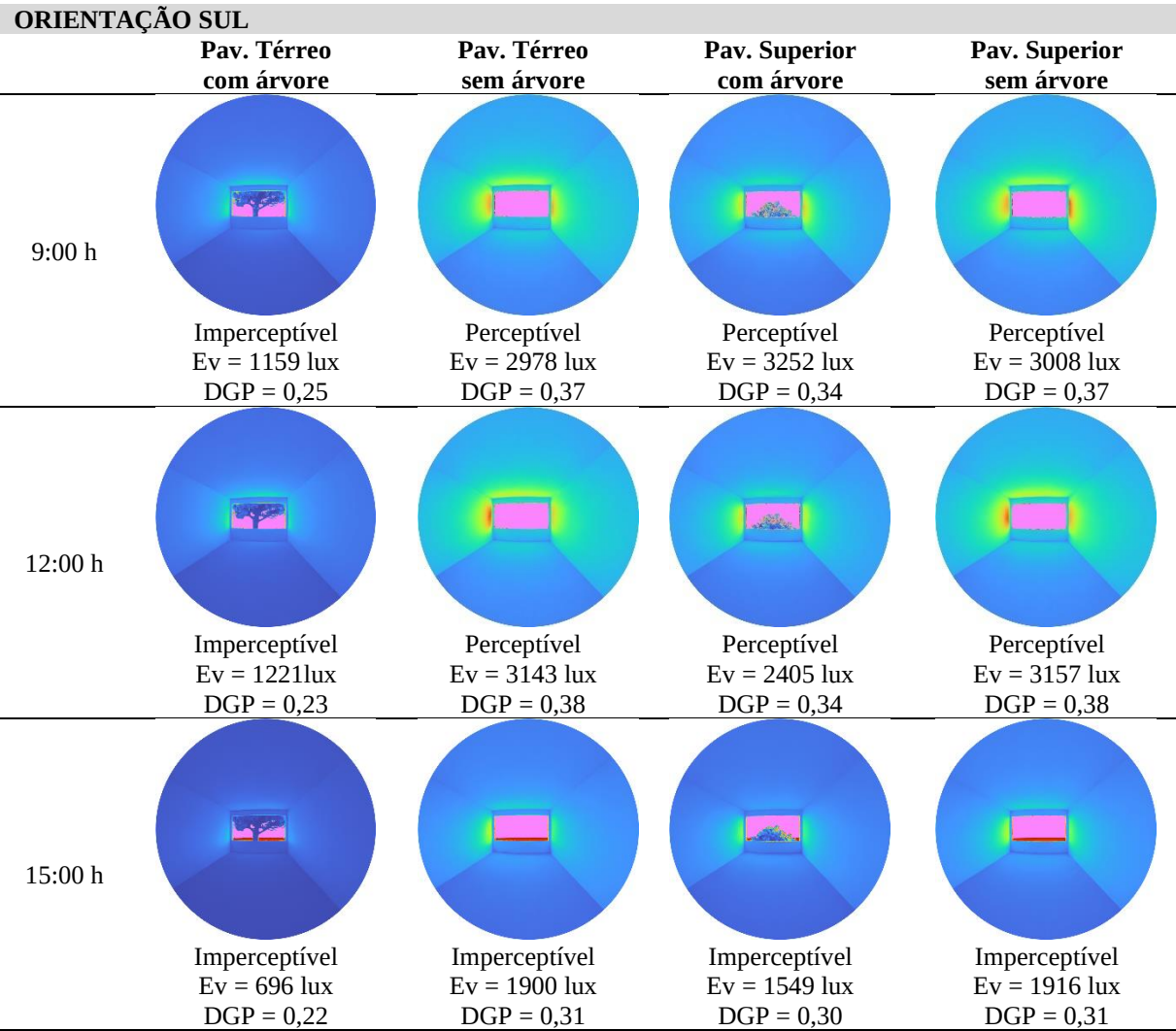
Figura 93 – Mapas e luminância com cores falsas para a orientação norte



Fonte: dados da pesquisa, 2023.

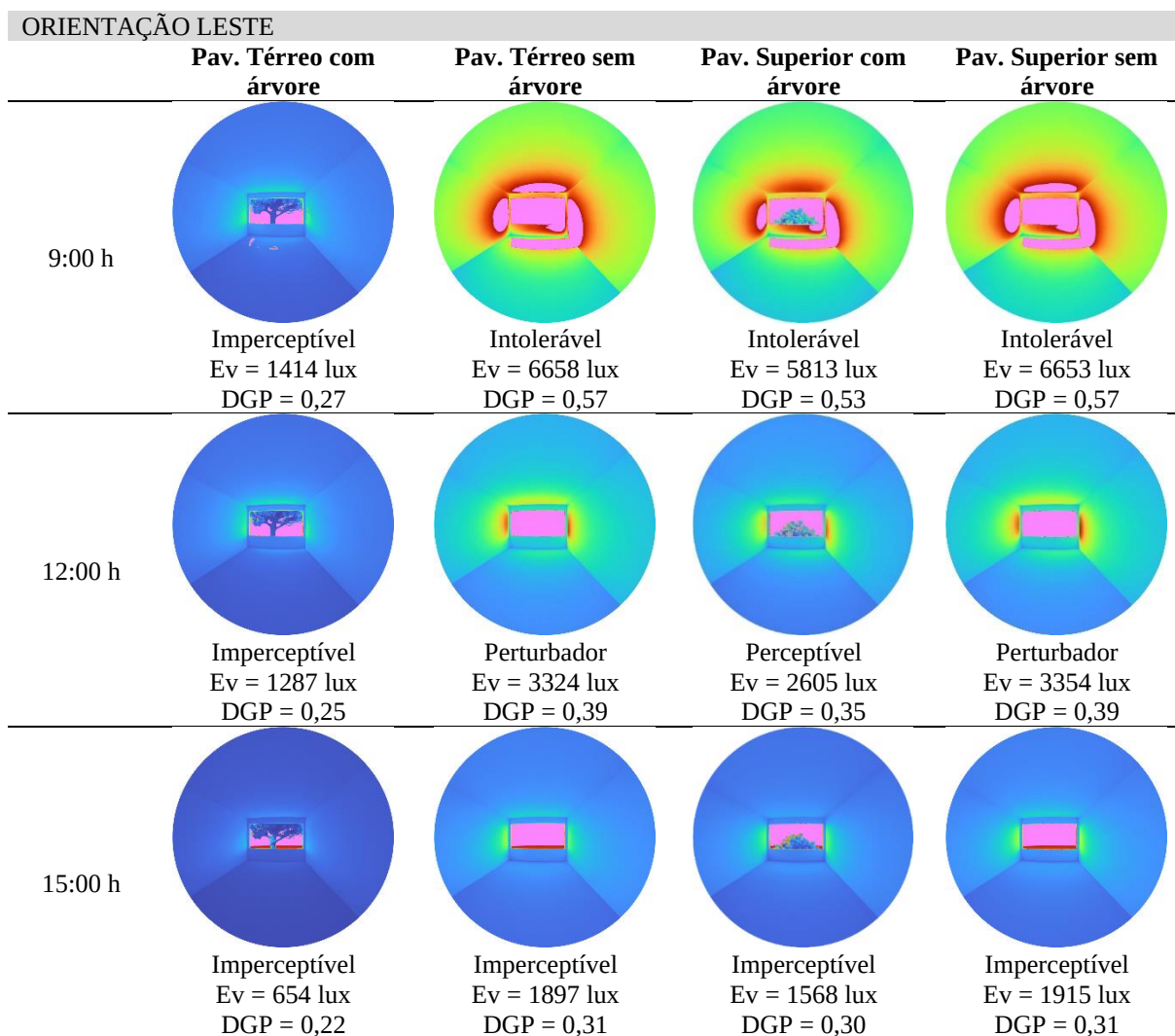
O ofuscamento na orientação sul (Figura 94) foi classificado como imperceptível e perceptível. O pavimento térreo com árvore apresentou ofuscamento imperceptível nos três horários simulados. A situação sem árvore apresentou ofuscamento perceptível no horário da manhã e ao meio-dia e imperceptível no período da tarde. O comportamento do ofuscamento no pavimento superior é semelhante nas condições com e sem árvore. A presença da árvore também exerceu influência na redução do DGP neste pavimento.

Figura 94 – Mapas e luminância com cores falsas para a orientação sul



Fonte: dados da pesquisa, 2023.

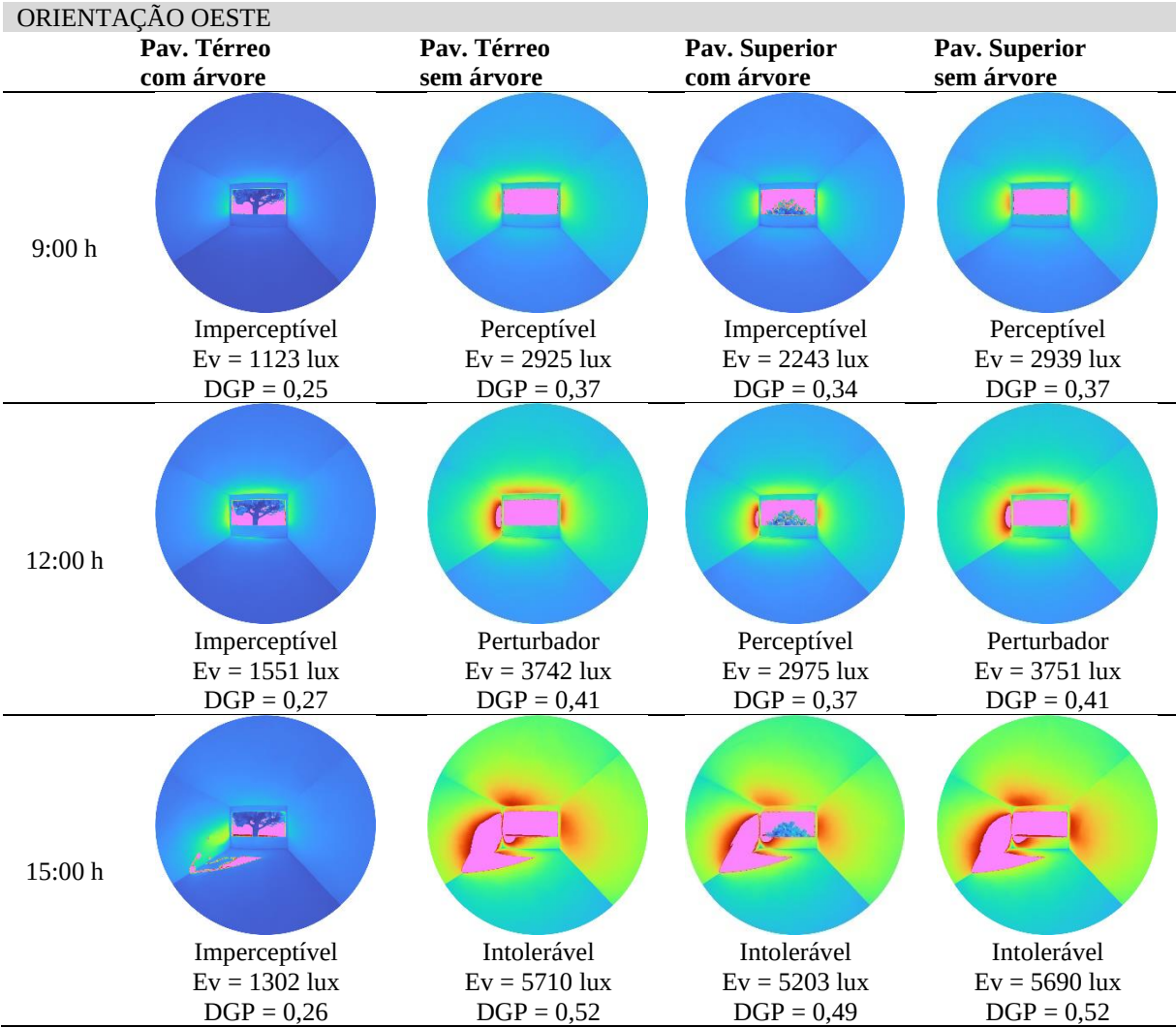
O pavimento térreo com árvore apresentou ofuscamento imperceptível na orientação leste (Figura 95). Nos demais cenários desta orientação, o ofuscamento foi intolerável no período da manhã, perturbador ao meio-dia e imperceptível no período da tarde. Também se observa redução da iluminância vertical e DGP na condição com árvore do pavimento superior em relação à condição sem a presença da árvore.

Figura 95 – Mapas e luminância com cores falsas para a orientação leste

Fonte: dados da pesquisa, 2023.

Da mesma forma que nas orientações anteriores, na orientação oeste (Figura 96), o pavimento térreo com árvore apresentou ofuscamento imperceptível nos três horários simulados. Na condição sem árvore, o ofuscamento foi perceptível pela manhã, perturbador ao meio-dia e intolerável no período da tarde. Observa-se que, especialmente nesta orientação, o pavimento superior apresentou diferenças mais significativas entre as situações com e sem a presença da árvore. No horário da manhã, a classificação do ofuscamento passou de perceptível para imperceptível e, ao meio-dia, de perturbador para perceptível sem e com árvore, respectivamente. No período da tarde, a classificação do ofuscamento foi intolerante em ambos os casos.

Figura 96 – Mapas e luminância com cores falsas para a orientação oeste



Fonte: dados da pesquisa, 2023.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa objetivou caracterizar um método para levantamento e modelagem da vegetação arbórea para a simulação computacional da luz natural. Nesse contexto, os dados desta pesquisa são provenientes de duas fontes: medições sob condições de céu real e simulações computacionais da luz natural, ambas tendo a vegetação como elemento principal. A partir dos resultados obtidos, foram realizadas análises comparativas que buscaram validar os resultados das simulações computacionais, verificando em que medida o modelo 3D computacional da árvore representa adequadamente a árvore real utilizada na etapa da coleta de campo.

Nos itens a seguir, são apresentadas as principais conclusões, relacionando-as com os objetivos propostos. Também são apresentadas as limitações encontradas para a realização deste trabalho, bem como recomendações para trabalhos futuros que possam dar continuidade ao estudo a partir dos resultados alcançados.

5.1 Quanto às análises descritivas

Foram apresentadas as estimativas de localização, variabilidade e distribuição dos dados obtidos com as medições sob céu real e as simulações computacionais da luz natural.

Os registros da iluminância externa sob céu real foram agrupados a partir de três condições de céu (claro, parcial e encoberto). Os maiores níveis de iluminância horizontal atingidos ocorreram na condição de céu claro, seguido do céu parcial e encoberto. A maior variabilidade da luz observada foi para a condição de céu parcial. A condição de céu claro registrou a menor variabilidade. Sobre a iluminância interna, observou-se que a presença da árvore exerceu maior influência no pavimento térreo, independente da orientação. Considerando as medianas da iluminância, a redução relativa nos níveis de luz no ambiente com a presença da árvore chegou a atingir aproximadamente 97% (orientação oeste) em relação ao ambiente sem a presença da árvore. O pavimento superior apresentou diferenças menos significativas entre as condições com árvore e sem árvore. Apesar de os registros na condição sem árvore apresentarem maiores amplitudes, as medianas, em ambas as condições, são bastante semelhantes. A maior redução nos níveis de iluminação neste pavimento, considerando a presença da árvore, ocorreu na orientação sul (19,05%).

Os dados de iluminância extraídos das simulações computacionais corresponderam ao período de um ano. Observou-se comportamento semelhante dos níveis de iluminância em relação aos

dados extraídos com as medições. Para todas as orientações do pavimento térreo, a variabilidade e a amplitude da iluminância da condição com árvore são significativamente menores em relação à condição sem árvore. A maior redução da iluminância ocorreu na orientação leste, com mediana da iluminância da situação com árvore 73,1% menor que a situação sem árvore. No pavimento superior, as maiores amplitudes e variação da luz ocorreram nas orientações leste e oeste. Neste pavimento, a redução relativa nos níveis de luz no ambiente com a presença da árvore atingiu aproximadamente 21,3% (orientação oeste) em relação ao ambiente sem a presença da árvore.

5.2 Quanto às análises comparativas

Para validar os resultados obtidos com as simulações computacionais e verificar em que medida o modelo 3D virtual da árvore é um representante adequado do modelo arbóreo em escala reduzida utilizado nas medições em campo, foram realizadas análises comparativas entre os dados de medições e simulações da luz natural.

A iluminância externa, medida sob céu real, e a simulada apresentaram comportamentos semelhantes em relação à variabilidade da luz, embora os resultados obtidos com a simulação tenham sido subestimados em relação à medição. Com base nos valores das medianas, a redução relativa da iluminância simulada em relação à medida é de aproximadamente 11,9%. Pode-se relacionar esta diferença a alguns fatores, sendo o mais importante a condição de entorno nas medições sob céu real, que não foi perfeitamente considerado na simulação computacional.

Os dados de iluminação interna medidos e simulados foram comparados, considerando cada cenário (pavimento térreo com árvore e sem árvore; pavimento superior com árvore e sem árvore) e para cada orientação separadamente. Em todos os casos, ficou evidenciado que a comparação entre os conjuntos dos dados medidos e simulados obedeceram a uma tendência. Observou-se que as simulações foram subestimadas apenas na orientação sul. Já nas demais orientações, foram superestimadas. Esta situação sugere que as propriedades espectrais das superfícies internas do modelo físico em escala e do modelo 3D computacional estão divergindo de alguma forma. E, além disso, considera-se que a presença da luz solar direta observada nas orientações norte, leste e oeste também possa contribuir para este fato.

Por meio do teste de hipótese de Mann-Whitney, verificaram-se as chances de semelhanças ou diferenças entre o comportamento dos dados medidos e simulados (amostras independentes), estimando margens de erro com limites superiores e inferiores a 5% do valor esperado (intervalos de confiança de 95%). O tamanho do efeito também foi analisado.

Concluiu-se que as medianas e/ou as distribuições da iluminância simulada e medida possuem diferenças estatisticamente significativas apenas nos seguintes cenários: no pavimento térreo sem árvore (norte e leste) e no pavimento superior com e sem a presença da árvore (sul). Nos demais cenários, o teste de hipótese pode comprovar que não existem diferenças estatisticamente significativas entre a iluminância medida e simulada.

Os indicadores de efeitos foram considerados relativamente pequenos em todos os casos. O maior efeito observado foi no pavimento superior sem árvore, onde a probabilidade de a iluminância medida ser maior que a iluminância simulada é de 58,6%. O menor efeito observado foi no pavimento superior da orientação norte, onde a probabilidade de a iluminância simulada ser maior que a iluminância medida é de 50,7%.

A correlação entre a média horária da iluminância medida e simulada também foi analisada por meio do coeficiente de Spearman. Os resultados indicam correlações fortes em grande parte das situações simuladas e moderadas em alguns casos. Todos os cenários nas orientações sul, leste e oeste apresentaram correlações fortes, assim como na orientação norte, no pavimento superior com árvore. Correlações moderadas ocorreram na orientação norte, no pavimento térreo com e sem árvore, e no pavimento superior sem árvore.

Na análise comparativa em cada um dos pontos de medição, notou-se que o comportamento da luz no decorrer do dia, entre os dados medidos e simulados, obedece a uma mesma tendência em todos os cenários, apresentando maior uniformidade da luz e maior concordância entre os grupos de dados em todos os pontos do pavimento térreo com a presença da árvore e nos pontos mais próximos ao fundo do ambiente, em todos os cenários.

Realizou-se uma análise das diferenças encontradas entre medição e simulação, descrevendo os erros em relação às medições de referência. Para isso, foram utilizados os indicativos estatísticos RMSE e BEM. Observou-se que os erros apontados por estes indicadores tendem a ser maiores, principalmente nos pontos mais próximos à janela, onde estão expostos a uma quantidade e variabilidade maior de luz. Esse resultado significa que há uma maior dificuldade em prever a iluminância com maior precisão em locais com iluminação excessiva.

Os maiores erros foram observados principalmente nos cenários da orientação oeste, chegando a extrapolar o limite máximo de erro aceitável. Exceto no pavimento térreo com a presença da árvore, todos os pontos próximos à janela dos demais cenários desta orientação apresentaram erros acima de 35%. Com estes resultados, ficou evidenciado que, neste caso, os erros produzidos pelas simulações podem estar associados, principalmente, aos fatores externos (componente refletida das superfícies do entorno, componente refletida do céu, presença da luz

solar direta), visto que a presença da árvore interfere em parte significativa desses fatores.

Na maioria dos cenários estudados, os pontos localizados mais próximos ao fundo do ambiente apresentaram erros menores, evidenciando, mais uma vez, que os erros produzidos pelas simulações estão associados aos fatores externos, já que a área mais próxima ao fundo do ambiente recebe menor influência dos fatores externos já citados.

Constatou-se que, em, pelo menos, 86% dos pontos de medição, as simulações reproduziram de forma fidedigna as condições de iluminância horizontal simuladas com céu real, podendo ser, portanto, consideradas confiáveis.

Além da iluminância, também foram levantadas luminâncias sob condição de céu real (imagens HDR) e virtual. Tais dados permitiram o uso do índice de ofuscamento DGP. A correlação entre o DGP extraído das imagens HDR e o DGP extraído das simulações foi analisada por meio do coeficiente de Spearman (ρ). Os resultados mostraram que, estatisticamente, existe uma correlação entre estas duas variáveis, porém fraca. O coeficiente de determinação (R^2) indicou que os resultados são estatisticamente significativos em 47% das observações. Estes resultados já eram esperados devido, principalmente, à entrada direta da luz do sol no espaço em alguns horários e à consequente alteração da distribuição da iluminância nas superfícies.

Diferenças entre resultados de medições e simulações são esperadas na prática da simulação devido às simplificações dos fenômenos luminosos ocorridos, especialmente no caso de simulações computacionais envolvendo elementos tão complexos, como copas de árvores. Assim, conclui-se que o modelo digital simplificado de árvore testado neste trabalho é adequado à simulação da permeabilidade da copa à passagem da luz natural.

De modo geral, pode-se supor que as principais fontes de discrepâncias entre as medições em um modelo em escala reduzida sob céu real e as simulações computacionais são: 1) ausência do entorno no modelo computacional; 2) as diferenças entre os tipos de céu (céu real e o modelo de céu de Perez utilizado nas simulações); 3) a presença da luz solar direta em alguns momentos; 4) diferenças nas características fotométricas entre os materiais reais utilizados nos modelos físicos e os materiais empregados nas simulações; 5) ausência de escala dos dispositivos utilizados nas medições de campo.

5.3 Quanto à análise do impacto da vegetação arbórea na luz natural

Com relação aos dados obtidos com as medições sob céu real, o teste de probabilidade de Mann-Whitney mostrou que existem diferenças estatisticamente significativas nos níveis de

iluminância entre as situações com e sem a presença da árvore. As maiores diferenças ocorreram para o pavimento térreo, conforme já esperado.

Na orientação sul, por exemplo, a probabilidade de a iluminância registrada no pavimento térreo sem árvore ser maior que a iluminância registrada na condição com árvore é de aproximadamente 90%. No pavimento superior, esta probabilidade passa a ser de aproximadamente 59%.

Verificou-se também que a redução nos níveis de iluminação, considerando a presença da árvore, atingiu 70% no pavimento térreo da orientação oeste. Em todas as orientações, o pavimento térreo apresentou as maiores reduções com a presença da árvore. No pavimento superior, as maiores reduções nos níveis de iluminação observados ocorreram na porção mais próxima ao fundo do ambiente, chegando a, aproximadamente, 21% na orientação norte.

Por meio de um modelo de regressão logística binária, verificou-se o grau de influência das seguintes variáveis: árvore (ausência ou presença), o pavimento (térreo ou superior), o turno (manhã ou tarde) e a orientação (norte, sul, leste e oeste). O modelo mostrou que a árvore, o pavimento, o turno e a orientação, exceto a orientação sul, são previsores estatisticamente significativos para o desempenho da iluminação natural (preferível ou excessivo) no ambiente interno da amostra estudada. Este resultado foi verificado com base no valor p e na razão de chance (OR) com nível de significância de 95%. Apenas a orientação sul não foi considerada estatisticamente significativa para definir o desempenho da iluminação natural na amostra estudada. Os resultados mostraram que a variável de maior impacto na iluminação natural é a presença ou não do elemento arbóreo.

Os resultados encontrados para as métricas de iluminação natural abordados neste trabalho (ASE, sDA, UDI e DF), considerando os dados de medição sob céu real e os dados anuais extraídos das simulações computacionais, apresentam comportamento semelhante.

- Exposição Anual à Luz do Sol (ASE) – exceto no pavimento térreo com a presença da árvore, o limite máximo aceitável de 1000 lux foi excedido em quase 100% do tempo de medição e simulação nos pontos mais próximos à janela dos demais cenários.
- Autonomia Espacial da Iluminação Natural (sDA) – o limite mínimo de iluminância de 300 lux foi atendido em 100% da área de todos os cenários analisados. Ou seja: os ambientes receberam luz natural minimamente suficiente durante todo o período de medição e simulação.
- Iluminância Útil da Luz do Dia (UDI) – tanto na iluminância medida como nos dados anuais obtidos com as simulações, a faixa de iluminância útil foi predominante no pavimento térreo com a presença da árvore e nos pontos mais próximos ao fundo do

ambiente dos demais cenários. Os pontos mais próximos à janela enquadraram-se na faixa de excessivamente iluminados.

- Fator de Luz do Dia (DF) – o pavimento térreo com a presença da árvore apresentou os menores fatores de luz do dia, especialmente nos pontos próximos ao fundo da sala, sugerindo iluminação inadequada. Já na porção mais próxima à janela, foi classificada como iluminada adequadamente. Os demais cenários apresentaram comportamento semelhante entre si, com iluminação excessiva próximo à janela e iluminação adequada na porção do ambiente mais próximo ao fundo.

Os resultados obtidos por meio das imagens HDR e dos mapas de luminâncias indicam que a presença da árvore exerce maior influência no pavimento térreo, especialmente quando há incidência direta da luz solar, provocando alterações significativas na luminância das superfícies.

Os resultados da probabilidade de ofuscamento (DGP) indicaram que, com a presença da árvore, especialmente no pavimento térreo, é possível reduzir, consideravelmente, a probabilidade de ofuscamento. Observou-se que, principalmente nos horários em que há luz solar direta dentro do ambiente, o sombreamento causado pela copa da árvore foi capaz de atenuar o brilho excessivo vindo das superfícies internas.

Na avaliação da probabilidade de ofuscamento anual, observou-se que a presença da árvore causou impacto significativo nesta variável. No pavimento térreo, a probabilidade de ofuscamento foi classificada imperceptível em praticamente 100% do tempo. No pavimento superior, em grande parte do tempo, a probabilidade de ofuscamento foi classificada entre imperceptível e perceptível.

REFERÊNCIAS

- ABHIJITH, K. V. *et al.* Air pollution abatement performances of green infrastructure in open road and built-up street canyon environments: A review. **Atmospheric Environment**, v. 162, p. 71-86, 2017.
- ABREU-HARBICH, L. V. de; LABAKI, L. C.; MATZARAKIS, A. Effect of tree planting design and tree species on human thermal comfort in the tropics. **Landscape and Urban Planning**, v. 138, p. 99-109, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.02.008>> Acesso em: 10 mar. 2021.
- ACOSTA, I. *et al.* Minimum Daylight Autonomy: A New Concept to Link Daylight Dynamic Metrics with Daylight Factors. **Leukos**, v. 15, n. 4, p. 251-269, 2019. DOI: 10.1080/15502724.2018.1564673.
- AFFOLDERBACH, J.; SCHULZ, C. Positioning Vancouver through urban sustainability strategies? The Greenest City 2020. **Action Plan. Journal of Cleaner Production**, v. 164, p. 676-685, 2017.
- AGAR, N. S. *et al.* The basal layer in human squamous tumors harbors more UVA than UVB fingerprint mutations: a role for UVA in human skin carcinogenesis. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 101, n. 14, p. 4954–4959, 2004. Disponível em: <<https://www.pnas.org/doi/full/10.1073/pnas.0401141101>> Acesso em: 10 mar. 2021.
- AICARDI, I.; DABOVE, P.; LINGUA, A. M.; PIRAS, M. Integration between TLS and UAV photogrammetry techniques for forestry applications. **Forest: Biogeosciences and Forestry**, v. 10, p. 41-47, 2015. DOI: 10.3832/for1780-009.
- AL-SALLAL, K. A.; AL-RAIS, L. A Novel Method to Model Trees for Building Daylighting Simulation Using Hemispherical Photography. **Journal of Building Performance Simulation**, v. 6, n. 1, p. 38-52, jan. 2012.
- AL-SALLAL, K.A., ABU-OBEID, N. Effects of shade trees on illuminance in classrooms in the United Arab Emirates. **Architectural Science Review**, Emirados Árabes, v. 52, n. 4, p. 295–311, 2009.
- AL-SALLAL, K. A Practical method to model trees for daylighting simulation using hemispherical photography. **Building Simulation: Eleventh International IBPSA Conference**, 2009.
- AL-SALLAL, A. K.; AHMED, L. Improving natural light in classroom Spaces with local trees: simulation analysis under the desert conditions of the UAE. **Building Simulation**, p. 1168-1174, 2007. Disponível em: <chromeextension://efaidnbmninnibpcapjpcglclefindmkaj/http://www.ibpsa.org/proceedings/bs2007/p027_final.pdf> Acesso em: 12 Mar. 2021.
- AMORIM, J. H. *et al.* CFD modelling of the aerodynamic effect of trees on urban air pollution dispersion. **Science of the Total Environment**, v. 461, p. 541-551, 2013.

- ARMSON, D.; STRINGER, P.; ENNOS, A.R. The effect of tree shade and grass on surface and globe temperatures in an urban area. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 11, p. 245-255, 2012.
- AZCARATE, I. *et al.* Tree layout methodology for shading pedestrian zones: Thermal comfort study in Bilbao (Northern Iberian Peninsula). **Sustainable Cities and Society**, v. 72, 2021.
- BACHIR, N. *et al.* The simulation of the impact of the spatial distribution of vegetation on the urban microclimate: A case study in Mostaganem. **Urban Climate**, v. 39, 2021.
- BAKER, N.; STEEMERS, K. Daylight design of buildings: a handbook for architects and **engineers**. London: Routledge, 2002. 260 p.
- BAKER, N. V.; FANCHIOTTI, A.; STEEMERS, K. A. (editors). **Daylighting in Architecture: A European Reference Book**. London: James & James, 1993.
- BALAKRISHNAN, P.; JAKUBIEC, A. Measuring light through trees for daylight simulations: a photographic and photometric method. **In: Building Simulation and Optimization Conference**, 2016, Newcastle, England.
- BALAKRISHNAN, P. Measuring and Modeling Equatorial Light. 2019. Tese (Doutorado em Arquitetura e sustentabilidade) – Singapore University of Technology and Design, Singapore, 2019.
- BALENSIEFER, M; WIECHETECK, M. **Arborização de cidades**. Curitiba: ITC, 1985. 24 p
- BALOGUN, A. A.; MORAKINYO, T. E.; ADEGUN, O. B. Effect of tree-shading on energy demand of two similar buildings. **Energy and Buildings**, v. 81, p. 305-315, 2014.
- BARNEA, S.; FILIN, S. Extraction of Objects from Terrestrial Laser Scans by Integrating Geometry Image and Intensity Data with Demonstration on Trees. **Remote Sensing**, v. 4, n. 1, p. 88-110, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/rs4010088>> Acesso em: 12 Mar. 2021.
- BARONA, C. O.; WOLF, K.; KOWALSKI, J. M.; KENDAL, D.; BYRNE, J. A.; CONWAY, T. M. Diversity in public perceptions of urban forests and urban trees: A critical review. **Landscape and Urban Planning**, v. 226, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2022.104466>.
- BATER, C. W. *et al.* Stability of sample-based scanning LiDAR-derived vegetation metrics for forest monitoring. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 49, p. 2385-2392, 2011.
- BARTHOLOMEI, C. L. B. **Influência da Vegetação no Conforto Térmico Urbano e no Ambiente Construído**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003. 144 f.
- BELAND, M. *et al.* On promoting the use of lidar systems in forest ecosystem research.

Forest Ecology and Management, v. 450, 2019. DOI: 10.1016/j.foreco.2019.117484.

BELLIA, L. *et al.* Impact of daylight saving time on lighting energy consumption and on the biological clock for occupants in office buildings. **Solar Energy**, v. 211, p. 1347-1364, 2020. ISSN 0038-092X. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.10.072>> Acesso em: 23 fev. 2022.

BERG, M. *et al.* Health benefits of green spaces in the living environment: A systematic review of epidemiological studies. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 14, p. 806-816, 2015.

BERRY, R.; LIVESLEY, S. J.; AYE, L. Tree canopy shade impacts on solar irradiance received by building walls and their surface temperature. **Building and Environment**, v. 69, p. 91-100, 2013.

BEYER, K. M. M. *et al.* Exposição ao espaço verde da vizinhança e saúde mental: evidências da pesquisa de saúde de Wisconsin. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 11, n. 3, p. 3453-3472, 2014.

BIAN, Y.; DAI, Q.; MA, Y.; LIU, L. Variable set points of glare control strategy for side-lit spaces: Daylight glare tolerance by time of day, **Solar Energy**, v. 201, p. 268-278, 2020.

BIONDI, D.; ALTHAUS, M. **Árvores de rua de Curitiba: cultivo e manejo**. Curitiba: FUPEF, 2005. 182 p.

BODART, M.; DENEYER, A.; HERDE, A.; WOUTERS, P. A Guide for Building Daylight Scale Models. **Architectural Science Review**, v. 50, p. 31-36, 2007.

BODART, M.; CAUWERTS, C. Assessing daylight luminance values and daylight glare probability in scale models. **Building and Environment**, v. 113, p. 210-219, 2017. ISSN 0360-1323. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.08.033>> Acesso em: 10 jul. 2022.

BONGERS, F. J. Functional-structural plant models to boost understanding of complementarity in light capture and use in mixed-species forests. **Basic and Applied Ecology**, v. 48, p. 92-101, 2020. DOI: 10.1016/j.baae.2020.09.007.

BOSCH, M.; ODE SANG, A. Urban natural environments as nature-based solutions for improved public health – A systematic review of reviews. **Environmental Research**, v. 158, p. 373–384, 2017.

BOUDON, F. *et al.* Quantitative assessment of automatic reconstructions of branching systems obtained from laser scanning. **Annals of Botany**, v. 114, p. 853–862, 2014. DOI:10.1093/aob/mcu062.

BOURNEZ, E. *et al.* Impact of level of details in the 3D reconstruction of trees for microclimate modeling. **XXIII ISPRS Congress** - Prague, Czech Republic, p.257-264, 2016. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLI-B8-257-2016.

BOURNEZ, E. *et al.* Sensitivity of simulated light interception and tree transpiration to the

level of detail of 3D tree reconstructions. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 38, p. 1-10, 2019. ISSN 1618-8667, DOI: 10.1016/j.ufug.2018.10.016.

BOWLER, D.E.; BUYUNG-ALI, L.; KNIGHT, T.M.; PULLIN, A.S. Urban greening to cool towns and cities: a systematic review of the empirical evidence. **Landscape and Urban Planning**, v. 97, p. 147-155, 2010.

BRASIL. **Boletim agropecuário da Universidade Federal de Lavras**. n.º 66 - p. 1-13, Lavras – MG, 2004.

BRATMAN, G. N.; HAMILTON, J. P.; DAILY, G. C. The impacts of nature experience on human cognitive function and mental health. **Annals of the New York Academy of Sciences**, p. 118–136, 2012.

BUCCOLIERI, R. *et al.* Analysis of local scale tree-atmosphere interaction on pollutant concentration in idealized street canyons and application to a real urban junction. **Atmospheric Environment**, v. 45, p. 1702-1713, 2011.

BUCKSCH, A.; LINDENBERGH, R.; MENENTI, M. SkelTre: robust skeleton extraction from imperfect point clouds. **The Visual Computer**, v. 26, p.1283 –1300, 2010. DOI: 10.1007/s00371-010-0520-4.

BUCCOLIERI, R. *et al.* Analysis of local scale tree–atmosphere interaction on pollutant concentration in idealized street canyons and application to a real urban junction. **Atmos. Environ.**, 45, p. 1702-1713, 2011.

BUDEI, B. C. *et al.* Identifying the genus or species of individual trees using a three-wavelength airborne lidar system. **Remote Sensing of Environment**, v. 204, p. 632 – 647, 2018. DOI: 10.1016/j.rse.2017.09.037.

BUENO-BARTHOLOMEI, C. L.; LABAKI, L. C. How much does the change of species of trees affect their solar radiation attenuation? **In: 5th International Conference on Urban Climate**, 2003, Lodz, Poland. Proceedings [...]. Lodz: University of Lodz, 2003.

CALQUÍN, P. F. *et al.* Influence of urban trees on noise levels in a central Chilean city. **Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias UNCuyo**, v. 51, p. 41–53, 2019.

CAMACHO-CERVANTES, M. *et al.* Como as pessoas percebem as árvores urbanas? Avaliando gostos e desgostos em relação às árvores de uma cidade. **Urban Ecosyst**, v. 17, p. 761–773, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11252-014-0343-6>> Acesso em: 24 fev. 2022.

CANNON-BROOKES, S. W. A. Simple scale models for daylighting design: analysis of source of errors in illuminance prediction. **Lighting Research & Technology**, v. 29, p. 135 – 142, 1997.

CANTÓN, M. A.; CORTEGOSO, J. L.; DE ROSA, C. Solar permeability of urban trees in cities of western Argentina. **Energy and Buildings**, v. 20, n. 3, p. 219–230, 1994.

CARLUCCI, S. *et al.* A review of indices for assessing visual comfort with a view to their use

in optimization processes to support building integrated design. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 47, p. 1016-1033, 2015.

CASTAÑO, A.G. Avaliação e calibração de um céu artificial para estudos de iluminação natural com modelos físicos em escala reduzida. 2007. 151f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

CHAIYAKUL, Y. Reduction of daylight in urban canyons with trees. **In:** Conference on Passive and Low Energy Architecture, 2004, Eindhoven. Anais eletrônico... Disponível em: <<http://alexandria.tue.nl/openaccess/635611/p0545final.pdf>> Acesso em: 21 jan. 2021.

CHAUVEL, P. *et al.* Glare from windows: current views of the problem. **Light Res Technol**, v. 14, n. 1, p. 31-46, 1982.

CHENG, Z. *et al.* Alignment of municipal climate change and urban forestry policies: A Canadian perspective. **Environmental Science and Policy**, v. 122, p. 14-24, 2021. DOI: 10.1016/j.envsci.2021.06.017.

CHENG, C. L. *et al.* A mini-scale modeling approach to natural daylight utilization in building design. **Building and Environment**, v. 42, n. 1, p. 372-384, 2007. ISSN 0360-1323. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.08.004>> Acesso em: 23 fev. 2022.

CHEN, D. *et al.* Urban vegetation for reducing heat related mortality. **Environmental Pollution**, v. 192, p. 275-284, 2014.

CHEN, T. *et al.* Effects of tree plantings and aspect ratios on pedestrian visual and thermal comfort using scaled outdoor experiments, **Science of The Total Environment**, v. 801, 2021.

CIBSE. LG10 – **Daylight and Window Design (Lighting Guide)**. Chartered Institution of Building Services Engineers, 1999.

CIE. **Discomfort glare in interior lighting**. CIE 17. Vienna, Austria, 1995.

CLEAR, R. D. Discomfort Glare: what do we actually know? **Lighting Research and Technology**, v. 45, n. 2, p. 141-158, abr. 2012.

CLIMATE.onebuilding.org (2022). Disponível em: <<https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/1477153511420>> Acesso em: 10 Jul. 2020.

CODER, R. D. Identified benefits of community trees and forests. **University of Georgia**, October, p. 7, 1996.

COHEN, J. **Statistical power analysis for the behavioral sciences**. Hillsdale, NJ: Erlbaum, 1988.

CORDEIRO, A. C. A. O uso de cobogós como uma segunda pele em edifícios de escritórios: análise do desempenho lumínico de diferentes geometrias. 2018. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

CÓRICA, L.; PATTINI, A. Evaluación de iluminancias verticales sobre fachadas en cañones urbanos forestados de la ciudad de mendoza, argentina. **Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente**, Mendoza, v. 16, p. 89-96, 2012. ISSN 0329-5184.

CÔTÉ, J. F. *et al.* The structural and radiative consistency of three-dimensional tree reconstructions from terrestrial lidar. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, p. 1067-1081, 2009. DOI: 10.1016/j.rse.2009.01.017.

CÔTÉ J. F.; FOURNIER R. A.; EGLI R. An architectural model of trees to estimate forest structural attributes using terrestrial LIDAR. **Environmental Modeling & Software**, Canadá, v. 26, p. 761–777, 2011.

CÔTÉ, J.F *et al.* A fine-scale architectural model of trees to enhance LiDAR-derived measurements of forest canopy structure. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 166-167, p. 72–85, 2012. DOI: 10.1016/j.agrformet.2012.06.007.

CUNHA NETO, E. M. *et al.* Using high-density UAV-Lidar for deriving tree height of Araucaria Angustifolia in an Urban Atlantic Rain Forest. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 63, 2021. DOI: 10.1016/j.ufug.2021.127197.

DANDOIS, J.P.; ELLIS, E.C. Remote sensing of vegetation structure using computer vision. **Remote Sensing**, v. 2, p. 1157-1176, 2010. DOI: 10.3390/rs2041157.

DANDOIS, P.; OLANO, M.; ELLIS, E. C. Optimal altitude, overlap, and weather conditions for computer vision UAV estimates of forest structure. **Remote Sensing**, v. 7, p. 13895-13920, 2015.

DAVID, M., *et al.* Assessment of the thermal and visual efficiency of solar shades. **Build Environ**, v. 46, n. 7, p. 1489-1496, 2011.

DE GRUIJL, F. R.; VAN DER LEUN, J. C. Environment and health: 3. Ozone depletion and ultraviolet radiation. **Cmaj**, v. 163, n. 7, p. 851–855, 2000.

DIFFEY, B. L.; DIFFEY, J. L. Sun protection with trees. **British Journal of Dermatology**, v. 147, p. 397–398, 2002. DOI: doi.org/10.1046/j.1365-2133.2002.483010.x.

DIMOUDI, A. *et al.* Investigation of urban microclimate parameters in an urban center. **Energy and Buildings**, v. 64, p. 1-9, 2013.

DILLEN, S.M.E.; VRIES, S.; GROENEWEGEN, P.P.; SPREEUWENBERG, P. Greenspace in urban neighbour hoods and residents health: Adding quality to quantity **Journal of Epidemiology and Community Health**, v. 66, p. 1-8, 2012

DONOVAN, G. H.; BUTRY, D. T. The value of shade: Estimating the effect of urban trees on summertime electricity use. **Energy and Buildings**, v. 41, p. 662-668, 2009.

DREW-SMYTHE, J. J.; DAVILA, Y. C.; MCLEAN, C. M.; HINGEE, M. C.; MURRAY, M. L.; WEBB, J. K.; Krix, D. W.; Murray, B. R. Community perceptions of ecosystem services and disservices linked to urban tree plantings. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 82, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2023.127870>.

DÜMPELMANN, S. Urban Trees in Times of Crisis: Palliatives, Mitigators and Resources. **One Earth**, v. 2, p. 402-404, 2020.

DURANTE, L.; NOGUEIRA, M. C. J. A. Efeitos do sombreamento arbóreo nas condições termohigrométricas e lumínicas de ambientes internos e externos de edificações. **Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 9, n. 9, p. 1980-1998, fev., 2013. Disponível em: <<http://cascavel.ufsm.br/revistas/ojs-2.2.2/index.php/reget/article/view/7704>> Acesso em: 18 dez. 2020.

DWYER, J.F.; SCHROEDER, H.W.; GOBSTER, P.H. The significance of urban trees and forests: toward a deeper understanding of values. **Journal of Arboriculture**, v. 17, p. 276-284, 1991.

EINHORN, H.D. Discomfort glare: a formula to bridge differences. **Light Res Technol**, v. 11, p. 90-94, 1979.

ESCOBEDO, F.J. *et al.* Urban forests, ecosystem services, green infrastructure and nature-based solutions: Nexus or evolving metaphors? **Urban Forestry and Urban Greening**, v. 37, p. 3-12, 2019. DOI: 10.1016/j.ufug.2018.11.002.

ESCOBEDO, F. J.; KROEGER, T.; WAGNER, J. E. Urban forests and pollution mitigation: Analyzing ecosystem services and disservices, **Environmental Pollution**, v. 159, p. 2078-2087, 2011.

ESPÍRITO-SANTO, H.; DANIEL, F. Calcular e apresentar tamanhos do efeito em trabalhos científicos (1): As limitações do $p < 0,05$ na análise de diferenças de médias de dois grupos. **Revista Portuguesa de Investigação Comportamental e Social**, v. 1, n. 1, p. 3-16, 2015.

EVERS, J.B.; LETORT, V.; RENTON, M.; M. KANG. Computational botany: Advancing plant science through functional-structural plant modelling. **Annals of Botany**, China, v. 121, p. 767-772, 2018. DOI: 10.1093/aob/mcy050.

FABRIS, M.; A. PESCI, A. Automated DEM extraction in digital aerial photogrammetry: precisions and validation for mass movement monitoring. **Annals of Geophysics**, v. 48, n. 6, 2005.

FAN, G. *et al.* New Quantitative Approach to Tree Attributes Estimation Based on LiDAR Point Clouds. **Remote Sensing**, v. 12, n. 11, p. 1-20, 2020. DOI: 10.3390/rs12111779

FAN, D.; PAINTER, B.; MARDALJEVIC, J. A Data Collection Method for Long-Term Field Studies of Visual Comfort in Real-World Daylit Office Environments. **In: Proceedings of PLEA**, 2009, p. 251-256.

FENG, Y.; TAN, P. Y. Imperatives for greening cities: a historical perspective Greening Cities: Forms and Functions, **Springer, Singapore**, p. 41-70, 2017.

FERNANDES, C. O. *et al.* Between tree lovers and tree haters. Drivers of public perception regarding street trees and its implications on the urban green infrastructure planning. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 38, p. 97-108, 2019. Disponível em:

<<https://doi.org/10.1016/j.ufug.2018.03.014>> Acesso em: 16 abr. 2022.

FIELD, A. **Descobrendo a estatística usando o SPSS**. 2. ed. Porto Alegre: Artmed, 2009.

FONSECA, R. W. da. **Iluminação natural e consumo energético de edificações não residenciais: aplicação de redes neurais artificiais**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

GASCON, M. *et al.* Long-term exposure to residential green and blue spaces and anxiety and depression in adults: A cross-sectional study. **Environmental Research**, v. 162, p. 231-239, 2018.

GAZDA, A.; KĘDRA, K. Tree architecture description using a singleimage photogrammetric method. **Dendrobiology**, v. 78, p. 124–135, 2017. DOI: 10.12657/denbio.078.012

GE, J.; WANG, Y.; AKBARI, H.; ZHOU, D.; GU, Z.; MENG, X. Cooling energy saving by vegetation planting in high-density districts: Evaluation using the coupled simulation. **Building and Environment**, v. 232, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110054>> Acesso em: 10 maio. 2023.

GERSTENBERG, T.; HOFMANN, M. Perception and preference of trees: A psychological contribution to tree species selection in urban areas. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 15, p. 103-111, 2016.

GETZ, D. A.; KAROW, A.; KIELBASO, J. J. Inner city preferences for trees and urban forestry programs. **Journal of Arboriculture**, v. 8, n. 10, p. 258–263, 1982.

GIES, P. *et al.* Assessment of the UVR protection provided by different tree species. **Photochemistry and Photobiology**, v. 83, n. 6, p. 1465–1470, 2007.

GILLNER, S.; VOGT, J.; THARANG, A.; DETTMANN, S.; ROLOFF, A. Role of street trees in mitigating effects of heat and drought at highly sealed urban sites, **Landscape and Urban Planning**, v. 143, p. 33-42, 2015.

GODIN, Christophe. Representing and encoding plant architecture: A review. **Annals of Forest Science**, v. 57, p. 413–438, 2000. DOI: 10.1051/forest:2000132.

GODIN, C.; SINOQUET, H. Functional–structural plant modelling, **New Phytologist**, v. 166, p. 705-708, 2005.

GÓMEZ-BAGGETHUN, E.; BARTON, D.N. Classifying and valuing ecosystem services for urban planning. **Ecological Economics**, v. 86, p. 235-245, 2013.

GRIFFON, S.; COLIGNY, F. AMAPstudio: A software suite for plants architecture modelling. In: **IEEE 4th International Symposium on Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications**, 2012, p. 141-147. DOI: 10.1109/PMA.2012.6524825.

- GRANT, R. H. *et al.* Ultraviolet leaf reflectance of common urban trees and the prediction of reflectance from leaf surface characteristics. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 120, n. 1–4, p. 127–139, 2003.
- GROMKE, C. Um conceito de modelagem de vegetação para ensaios aerodinâmicos prediais e ambientais em túneis de vento e sua aplicação em estudos de dispersão de poluentes. **Ambiente. Poluir.**, v. 159, p. 2094-2099, 2011.
- GUO, X.; GAO, Z.; BUCCOLIERI, R.; ZHANG, M.; SHEN, J. Effect of greening on pollutant dispersion and ventilation at urban street intersections. **Building and Environment**, v. 203, 2021.
- GUNAWARDENA, K.; WELLS, M.; KERSHAW, T. Utilising green and bluespace to mitigate urban heat island intensity. **Sci. Total Environ.**, v. 584-585, p. 1040-1055, 2017.
- GULSRUD, N.M.; HERTZOG, K.; SHEARS, I. Innovative urban forestry governance in Melbourne?: Investigating “green placemaking” as a nature-based solution. **Environmental Research**, v. 161, p. 158-167, 2018. DOI: 10.1016/j.envres.2017.11.005.
- GUTH, S.K. A method for the evaluation of discomfort glare. **Illum Eng**, v. 57, p. 351-364, 1963.
- HACKENBERG, J. *et al.* SimpleTree —An Efficient Open Source Tool to Build Tree Models from TLS Clouds. **Forests**, v. 6, p. 4245-4294, 2015. DOI: 10.3390/f6114245.
- HADAS, E. *et al.* Apple orchard inventory with a LiDAR equipped unmanned aerial system. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 82, 2019. DOI: 10.1016/j.jag.2019.101911.
- HARTIG, T. *et al.* **Health Benefits of Nature Experience: Psychological, Social and Cultural Processes**. 1. ed. Springer, 2011.
- HEISLER, G. M.; GRANT, R. H. Ultraviolet radiation in urban ecosystems with consideration of effects on human health. **Urban Ecosystems**, v. 4, p. 193–229, 2000.
- HERTEL, D.; SCHLINK, U. Decomposition of urban temperatures for targeted climate change adaptation. **Environmental Modelling and Software**, v. 113, p. 20-28, 2019.
- HERZOG, T. R. *et al.* Cultural and Developmental Comparisons of Landscape Perceptions and Preferences. **Environment and Behavior**, v. 32, n. 3, p. 323–346, 2000.
- HIRNING, M.B.; ISOARDI, G.L.; COWLING, I. Discomfort glare in open plan green buildings. **Energy and Buildings**, v. 70, p. 427-440, 2014. ISSN 0378-7788. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.11.053>> Acesso em: 18 Jun. 2022.
- HOLOPAINEN, M. *et al.* Tree mapping using airborne, terrestrial and mobile laser scanning - a case study in a heterogeneous urban forest. **Urban Forests Urban Green**, v. 12, p. 546-553, 2013.
- HONGBING, W. *et al.* Optimal tree design for daylighting in residential buildings. **Building**

and Environment, Shanghai, v. 45, p.2594-2606, mai. 2010.

HOPKINSON, R.; LONGMORE, J.; PETHERBRIDGE, P. **Iluminação Natural**. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, Portugal, 1975.

HOSMER, D. W.; LEMESHOW, S. **Regressão Logística Aplicada**. Wiley-Blackwell, 2005.

HOSOI, F.; OMASA, K. Voxel-Based 3-D Modeling of Individual Trees for Estimating Leaf Area Density Using High-Resolution Portable Scanning Lidar. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 44, n. 12, p. 3610-3618, dez. 2006. DOI: 10.1109/TGRS.2006.881743.

HU, Z.; LIEBENS, J.; RAO, K. R. Linking stroke mortality with air pollution, income, and greenness in northwest Florida: an ecological geographical study. **Int J Health Geogr**, v. 7, 2008.

HUANG, H.; HE, S.; CHEN, C. Leaf Abundance Affects Tree Height Estimation Derived from UAV Images. **Forests**, v. 10, p. 1-17, 2019 DOI: 10.3390/f10100931
Hubai Z. qdsrldashboard. Disponível em: <<https://dsrldashboard.info/>> Acesso em: 10 Jun. 2021.

IBARRA, D. I.; REINHART, C. F. Daylight factor simulations – how close do simulation beginners ‘really’ get? **Eleventh International IBPSA Conference Glasgow**, 2009.

IES – Illuminating Engineering Society. Approved Method: IES Spatial Daylight Autonomy (sDA) and Annual Sunlight Exposure (ASE). New York, 2012.

INANICI, M. N. Evaluation of High Dynamic Range Photography as a Luminance Data Acquisition System. **Lighting Research and Technology**, v. 2, n. 38, p. 123-136, 2006.

INANICI, M. N. Evaluation of High Dynamic Range Image-Based Sky Models in Lighting Simulation. **Journal of the Illuminating Engineering Society**, v. 7, p. 69-84, dec. 2010.

INANICI, M. N. Evaluation of High Dynamic Range Image-Based Sky Models in Lighting Simulation. **Leukos**, p. 37-41, dec. 2013.

INDIRABAI, I. et al. Terrestrial laser scanner based 3D reconstruction of trees and retrieval of leaf area index in a forest environment. **Ecological Informatics**, v. 53, p. 1 – 10, 2019. ISSN 1574-9541, DOI: 10.1016/j.ecoinf.2019.100986.

IP, K.; LAM, M.; MILLER, A. Shading performance of a vertical deciduous climbing plant canopy. **Building and Environment**, v. 45, n. 1, p. 81–88, 2010.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Cambridge: Cambridge University, 2021. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Full_Report.pdf. Acesso em: 16 Jan. 2022.

ISIBUE, E. W.; PINGELB, T. J. Unmanned aerial vehicle based measurement of urban

forests. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 48, 2020.

JAMES, M. R.; S. ROBSON, S. Mitigating systematic error in topographic models derived from UAV and ground-based image networks. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 39, p. 1413-1420, 2014.

JAMES, P.; BANAY, R. F.; HART, J. E.; LADEN, F. A review of the health benefits of greenness, **Current Epidemiology Reports**, v.2, p.131-42, 2015.

JANHÄLL, S. Review on urban vegetation and particle air pollution – Deposition and dispersion, **Atmospheric Environment**, v. 105, p. 130 – 137, 2015.

JANOUTOVÁ, R. *et al.* Influence of 3D Spruce Tree Representation on Accuracy of Airborne and Satellite Forest Reflectance Simulated in DART. **Forests**, v. 10, p. 1-35, 2019. DOI:10.3390/f10030292.

JAKUBIEC, J.; REINHART C. The 'adaptive zone' - a concept for assessing discomfort glare throughout daylight spaces. **Light. Res. Technol.**, v. 44, n. 2, p. 149-170, 2012.

JAKUBIEC, J. A. *et al.* Accurate Measurement of Daylit Interior Scenes Using High Dynamic Range Photography. **In: Proceedings of CIE Conference on Lighting Quality and Energy Efficiency**, 2016, Melbourne, Australia.

JIANG, R.; JÁUREGUI, D. V.; WHITE, K. R. Close-range photogrammetry applications in bridge measurement: Literature review, **Measurement**, v. 41, p. 823-834, 2008. DOI: 10.1016/j.measurement. 2007.12.005.

JONES, N. L., REINHART, C. F. Fast daylight coefficient calculation using graphics hardware. **In: Proceedings of the 14th Conference of International Building Performance Simulation Association, Hyderabad, India, Dec. 7–9, 2015.** pp. 1237–1244.

JURADO, J. M. *et al.* Multispectral Mapping on 3D Models and Multi-Temporal Monitoring for Individual Characterization of Olive Trees. **Remote Sensing**, v. 12, p. 1-26, 2020. DOI: 10.3390/rs12071106.

KAPLAN, A.; TAŞKIN, T.; ÖNENÇ, A. Assessing the Visual Quality of Rural and Urban-fringed Landscapes surrounding Livestock Farms. **Biosystems Engineering**, v. 95, n. 3, p. 437–448, 2006.

KARDAN, O. *et al.* Neighborhood greenspace and health in a large urban center. **Journal Nature-Scientific Reports**, v. 5, n. 11610, 2015.

KEARNEY, A. R. Residential development patterns and neighborhood satisfaction: Impacts of density and nearby nature. **Environment and Behavior**, v. 38, n. 1, p. 112–139, 2006.

KERBY, D.S. The simple difference formula: An approach to teaching nonparametric correlation. **Comprehensive Psychology**, v. 3, p. 11-IT, 2014.

KNIEMEYER, O.; W. KURTH, W. The Modelling Platform GroIMP and the Programming Language XL. **Computer Science**, v. 5088, Springer-Verlag, p. 570-572, 2008.

KO, Y. Trees and vegetation for residential energy conservation: A critical review for evidence-based urban greening in North America. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 34, p. 318-335, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ufug.2018.07.021>> Acesso em: 05 maio 2023.

KONG, F. *et al.* Retrieval of three-dimensional tree canopy and shade using terrestrial laser scanning (TLS) data to analyze the cooling effect of vegetation. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 217, p. 22–34, 2016. DOI: 10.1016/j.agrformet.2015.11.005.

KONG, Z.; JAKUBIEC, J. Alstan. Evaluations of long-term lighting qualities for computer labs in Singapore. **Building and Environment**, v. 194, p. 107689, 2021. ISSN 0360-1323. DOI: Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107689>> Acesso em: 05 mai. 2022.

KONG, Z. *et al.* Towards an integration of visual comfort and lighting impression: A field study within higher educational buildings. **Building and Environment**, v. 216, p. 108989, 2022. ISSN 0360-1323. DOI: Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.108989>> Acesso em: 14 jun. 2022.

KONIS, K. Predicting Visual Comfort in Side-lit Open-Plan Core Zones: Results of a Field Study Pairing High Dynamic Range Images with Subjective Responses. **Energy and Buildings**, v.77, p.67-79, 2014.

KRÜGER, E.L.; MINELLA, F.O.; RASIA, F. Impact of urban geometry on outdoor thermal comfort and air quality from field measurements in Curitiba, Brazil. **Build. Environ**, v.46, n.3, p.621-634, 2011.

KÜKENBRINK, D. *et al.* Modelling of three-dimensional, diurnal light extinction in two contrasting forests. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 296, p. 1-13, 2021.

KONDO, M. C. *et al.* Urban green space and its impact on human health. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, v. 15, p. 1-28, 2018.

KUO, F. E.; SULLIVAN, W. C. Environment and Crime in the Inner City: Does Vegetation Reduce Crime? **Environment and Behavior**, v. 33, p. 343 – 367, 2001.

KURNIA, K. A. *et al.* Visual Comfort Assessment Using High Dynamic Range Images under Daylight Condition in the Main Library Building of Institut Teknologi Bandung. **Procedia Engineering**, v. 170, p. 234-239, 2017.

LAFORTEZZA, R. *et al.* Benefits and well-being perceived by people visiting green spaces in periods of heat stress, **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 8, p. 97-108, 2009.

LANDES, T. *et al.* Modélisation 3D d'arbre pour comprendre le climat urbain: Un projet multidisciplinaire ambitieux. **Lasergrammétrie**, p. 61-68, 2014.

LANGENHEIM, N. *et al.* Right tree, right place, right time: a visual-functional design approach to select and place trees for optimal shade benefit to commuting pedestrians.

Sustain. Cities Soc., v. 52, p. 101816, 2020.

LAU, A. *et al.* P.Estimating architecture-based metabolic scaling exponents of tropical trees using terrestrial LiDAR and 3D modelling. **Forest Ecology and Management**, v. 439, p. 132–145, 2019.

LAVKER, R. M. *et al.* Quantitative Assessment of Cumulative Damage From Repetitive Exposures To Suberythemogenic Doses of Uva in Human Skin. **Photochemistry and Photobiology**, v. 62, n. 2, p. 348–352, 1995.

LECIGNE, B.; DELAGRANGE, S.; MESSIER, C. Exploring trees in three dimensions: VoxR, a novel voxel-based R package dedicated to analysing the complex arrangement of tree crowns. **Annals of Botany**, v. 121, p. 589–601, 2018. DOI: 10.1093/aob/mcx095.

LEE, A. C. K.; MAHESWARAN, R. The health benefits of urban green spaces: a review of the evidence, **Journal of Public Health**, v. 33, Pages 212–222, 2010.

LEE, E. S. *et al.* Modeling the direct sun component in buildings using matrix algebraic approaches: methods and validation. **Sol. Energy**, v. 160, p. 380-395, Sept. 2017. ISSN 0038092X. DOI: 10.1016/j.solener.2017.12.029.

LEE, E. S.; GEISLER-MORODER, D.; WARD, G. J. Modeling the direct sun component in buildings using matrix algebraic approaches: methods and validation. **Sol. Energy**, v. 160, p. 380-395, 2018.

LEEUWEN, M. *et al.* Automated reconstruction of tree and canopy structure for modeling the internal canopy radiation regime. **Remote Sensing of Environment**, v. 136, p. 286–300, 2013. DOI: 10.1016/j.rse.2013.04.019.

LIANG, X. *et al.* The use of a hand-held camera for individual tree 3D mapping in forest sample plots. **Remote Sensing**, v. 6, p. 65-87, 2014.

LIM, K. *et al.* LiDAR remote sensing of forest structure. **Progress in Physical Geography: Earth and Environment**, v. 27, pp. 88 - 106, 2003. DOI: 10.1191 / 0309133303pp360ra.

LI, X. *et al.* Laser scanning based three dimensional measurement of vegetation canopy structure. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 54, p. 152–158, 2014. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2013.08.010.

LI, D.H.W.; LAU, C.C.S.; LAM, J.C. Predicting daylight illuminance by computer simulation techniques. **Light. Res. Technol.**, v. 36, n. 2, p. 113-128, 2004. DOI: 10.1191/1365782804li108oa.

LI, Z. *et al.* The effectiveness of adding horizontal greening and vertical greening to courtyard areas of existing buildings in the hot summer cold winter region of China: A case study for Ningbo. **Energy and Buildings**, v. 196, p. 227-239, 2019.

LIU, Z. *et al.* Heat mitigation benefits of urban green and blue infrastructures: A systematic review of modeling techniques, validation and scenario simulation in ENVI-met V4. **Building and Environment**, v. 200, p. 1-15, 2021. DOI: 10.1016/j.buildenv.2021.107939 .

LIU, J.; SHEN, J.; ZHAO, R.; XU, S. Extraction of individual tree crowns from airborne LiDAR data in human settlements. **Mathematical and Computer Modelling**, v. 58, p. 524-535, 2013. DOI: 10.1016/j.mcm.2011.10.071.

LO, A. Y.; BYRNE, J. A.; JIM, C.Y. How climate change perception is reshaping attitudes towards the functional benefits of urban trees and green space: Lessons from Hong Kong, **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 23, p. 74-83, 2017.

LOUAFI, S.; ABDOU, S.; REITER, S. Effect of vegetation cover on thermal and visual comfort of pedestrians in urban spaces in hot and dry climate. **Nature & Technology Journal**, v. 17, p. 30-42, 2017.

MAAS, J. *et al.* Social contacts as a possible mechanism behind the relation between green space and health. **Health and Place**, v. 15, n. 2, p. 586–595, 2009.

MARTINS NETO, R. P. *et al.* **Avaliação da varredura laser terrestre em diferentes distâncias da árvore para mensurar variáveis dendrométricas**. BCG - Boletim de Ciências Geodésicas – On-Line version, v. 19, nº 3, p. 420-433, jul-set, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1982-21702013000300005>> Acesso em: 10 set. 2022.

MARDALJEVIC, J., HESCHONG, L., LEE, E. Daylight metrics and energy savings. **Light Res Technol**, v. 41, n. 3, p. 261-283, 2009.

MARDALJEVIC, J. Spatio-temporal dynamics of solar shading for a parametrically defined roof system. **Energy and Buildings**, v. 36, n. 8, p. 815-823, 2004. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778804000271>> Acesso em: 10 set. 2022.

MARDALJEVIC, J. Simulation of annual daylighting profiles for internal illuminance. **Light. Res. Technol.**, v. 32, n. 3, p. 111-118, 2000. Disponível em: <<http://lrt.sagepub.com/cgi/content/abstract/32/3/111>> Acesso em: 02 mar. 2022.

MASCARÓ, L.; MOORE, J. L. **Vegetação Urbana**. Porto Alegre: Masquatro, 2010.

MATOS, E.; H.; S.; F. **Dossiê Técnico: Cultivo de Bonsai**. Centro de Apoio ao Desenvolvimento Tecnológico da Universidade de Brasília – CDT/UnB, p. 1 – 34, junho – 2007.

MCNEIL, A. *et al.* A validation of a ray-tracing tool used to generate bi-directional scattering distribution functions for complex fenestration systems. **Sol. Energy**, v. 98, p. 404-414, Dec. 2013. ISSN 0038092X. DOI: 10.1016/j.solener.2013.09.032.

MCNEIL, A.; LEE, E. S. A validation of the Radiance three-phase simulation method for modelling annual daylight performance of optically complex fenestration systems. **J. Build. Perform. Simul.**, v. 6, n. 1, p. 24-37, Jan. 2013. ISSN 1940-1493. DOI: 10.1080/19401493.2012.671852.

MCNEIL, A.; LEE, E. S. A validation of the Radiance three-phase simulation method for modelling annual daylight performance of optically complex fenestration systems. **J. Build.**

Perform. Simul., v. 6, p. 24-37, 2012.

MCPHERSON, E. G.; SIMPSON, G. R. A comparison of municipal forest benefits and costs in Modesto and Santa Monica. **Urban Forestry and Urban Greening**, California, v. 1, p. 61 - 74, 2002.

MCPHERSON, E.G. *et al.* Million trees Los Angeles canopy cover and benefit assessment. **Landscape and Urban Planning**, v. 99, p. 40-50, 2011.

MCPHERSON, E. G.; DOORN, N.; GOEDE, J. Structure, function and value of street trees in California, USA. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 17, p. 104-115, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2016.03.013>.

MENDES, F. H.; ROMERO, H.; LOPES, A. M. S.; FRANCO, M. A. R.; SILVA, D. F. Valoração monetária da arborização urbana baseada na magnitude da copa em Piracicaba, SP-Brasil. **Revista LABVERDE**, v. 11, n. 01, 2021. DOI: <https://doi.org/10.11606/issn.2179-2275.labverde.2021.188889>.

MENDES, F.H. Estimativa da quantidade de árvores urbanas a partir de modelo estatístico e criação do Índice Mendes de Arborização Urbana. **Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana**, v. 16, n. 1, p. 81-93, 2021.

MILLER, J.; MORGENROTH, J.; GOMEZ, C. 3D modelling of individual trees using a handheld camera: Accuracy of height, diameter and volume estimates. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 14, p. 932-940, 2015.

MITCHELL, R.; POPHAM, F. Effect of exposure to natural environment on health inequalities: an observational population study. **The Lancet**, v.372, n.9650, p. 1655-1660, 2008.

MOORE, F. Concepts and practice of architectural daylighting. **Van Nostrand Reinhold Company**, New York, 1985.

MOORE, G. M. **Urban trees: worth more than they cost**. 10th National Street Tree Symposium 2009. Disponível em: <https://treenet.org/wp-content/uploads/2021/10/2009_SymposiumProceedings_FINAL.pdf#page=21> Acesso em: 25 jul. 2021.

MOHAMMAD, P. *et al.* Evaluating the role of the albedo of material and vegetation scenarios along the urban street canyon for improving pedestrian thermal comfort outdoors, **Urban Climate**, v. 40, 2021.

MOHAMMED, A., A review on machine learning algorithms to predict daylighting inside buildings, **Solar Energy**, v. 202, 2020, pp. 249-275, ISSN 0038-092X. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.03.104>> Acesso em: 15 Jul. 2022.

MONTEIRO, M. M. G.; TETTO, A. F.; BIONDI, D.; SOUZA, R. R. Percepção dos usuários em relação à arborização da Avenida Cândido de Abreu - Curitiba – PR. **Sociedade Brasileira de Arborização Urbana - REVSBAU**, Piracicaba – SP, v.8, n.2, p. 20-34, 2013. Disponível em: < <https://revistas.ufpr.br/revsbau/article/view/66367/38212>> Acesso em: 25

Jan. 2021.

MORAKINYO, T. Right tree, right place (urban canyon): tree species selection approach for optimum urban heat mitigation - development and evaluation. **Sci. Total Environ.**, v. 719, p. 137461, 2020.

MORGENROTHA, J.; GOMEZ, C. Assessment of tree structure using a 3D image analysis technique - A proof of concept. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 13, p. 198–203, 2014. DOI: 10.1016/j.ufug.2013.10.005.

MORGENROTH, J.; GOMEZ, C. Assessment of tree structure using a 3D image analysis technique - A proof of concept. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 13, p. 198–203, 2014.

MORIONDO, M. *et al.* Use of digital images to disclose canopy architecture in olive tree. **Scientia Horticulturae**, v. 209, p. 1–13, 2016. DOI: 10.1016/j.scienta.2016.05.021 .

MUKHERJEE, D. *et al.* Park availability and major depression in individuals with chronic conditions: Is there an association in urban India? **Health & Place**, v. 47, p. 54–62, 2017.

MULLANEY, J.; LUCKE, T.; TRUEMAN, S. J. A review of benefits and challenges in growing street trees in paved urban environments, **Landscape and Urban Planning**, v. 134, p. 157–166, 2015.

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.

NABIL, A.; MARDALJEVIC, J. Useful daylight illuminance: a new paradigm for assessing daylight in buildings. **Light. Res. Technol.**, 37 (2005), pp. 41–57.

NABIL, A.; MARDALJEVIC, J. Useful daylight illuminances: a replacement for daylight factors. **Energy Build**, v. 38, n. 7, p. 905–913, 2006.

NAKA, J. Y. Técnicas del Bonsái II. Omega; 2ª ed., Barcelona, 2006. **In:** Permeability Simulation Using Models Based on Louvers. **Building and Environment**, v. 73, p. 75–87, 2014.

NESBITT, L. *et al.* The social and economic value of cultural ecosystem services provided by urban forests in North America: a review and suggestions for future research. **Urban For. Urban Green**. v. 25, p. 103–111, 2017.

NG, W. Y.; CHAU, C. K. Evaluating the role of vegetation on the ventilation performance in isolated deep street canyons. **Int. J. Environ. Pollut.**, v. 50, p. 98–110, 2012.

NG, W. Y. *et al.* Preferences for street configuration and street tree planting in urban Hong Kong, **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 14, p. 30–38, 2015.

NILSSON K.; SANGSTER M.; KONIJNENDIJK C.C. Forests, Trees and Human Health and Well-being: Introduction. **Springer**, 2011.

NIU, J. *et al.* Summertime physiological and thermal responses among activity levels in campus outdoor spaces in a humid subtropical city. **Sci. Total Environ.**, v. 728, p. 138-757, 2020.

NOWAK, D. J.; DWYER, J. F. Understanding the Benefits and Costs of Urban Forest Ecosystems. **Springer**, New York, p. 10-25, 2007.

NOWAK, D. J. *et al.* Tree and forest effects on air quality and human health in the United States. **Environmental Pollution**, v. 193, p. 119-129, 2014.

OLBINA, S., BELIVEAU, Y. Developing a transparent shading device as a daylighting system. **Build Res Inform**, v. 37, n. 2, p. 148-163, 2009.

O'MALLEY, C. *et al.* Urban Heat Island (UHI) mitigating strategies: A case-based comparative analysis, **Sustainable Cities and Society**, v. 19, p. 222-235, 2015.

ORDÓÑEZ BARONA, C. *et al.* Diversity in public perceptions of urban forests and urban trees: A critical review. **Landscape and Urban Planning**, v. 226, p. 104-466, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2022.104466>> Acesso em: 24 fev. 2022.

PAN, J.; JAKUBIEC, J. A. Simulating the Impact of Deciduous Trees on Energy, Daylight, and Visual Comfort: Impact Analysis and a Practical Framework for Implementation. **In: Proceedings of eSim 2022: 12th Conference of IBPSA-Canada**. University of Toronto, Canada, 2022.

PANAGIOTIDIS, D. *et al.* Determining tree height and crown diameter from high-resolution UAV imagery. **Int. J. Remote Sensing**, v. 38, p. 2392-2410, 2017.

PANDIT, R.; LABAND, D. N. Energy savings from tree shade. **Ecological Engineering**, v. 69, p. 1324-1329, 2010.

PANDIT, R. *et al.* The effect of street trees on property value in Perth, Western Australia. **Landscape and Urban Planning**, v. 110, p. 134-142, 2012.

PEREIRA, G. *et al.* The association between neighborhood greenness and weight status: An observational study. Perth Western Australia Environ. **Health**, v. 12, p. 49, 2013.

PEREIRA, D. C. L. **Modelos físicos reduzidos: uma ferramenta para avaliação da iluminação natural**. 2006. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

PEREIRA, D. C. L. **Iluminação Natural em Edifícios de Escritório: metodologia para a avaliação do desempenho luminoso**. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

PERSSON, A. *et al.* Urban residential greenness and adiposity: A cohort study in Stockholm County. **Environment International**, v. 121, Part 1, p. 832-841, 2018.

PIERSON, C. *et al.* Tutorial: Luminance Maps for Daylighting Studies from High Dynamic Range Photography. **Leukos**, Volume 17, Issue 2, p. 140-169, 2020. ISSN 1550-2724. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/15502724.2019.1684319>> Acesso em: 16 Out. 2022.

PIVETA, J. **Influência de Elementos Paisagísticos no Desempenho Térmico de Edificação Térrea**. Londrina, 2010. 69 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2010.

POLYCAM-LIDAR 3D SCANNER. Disponível em: <<https://poly.cam/>> Acesso em: 15 Jun. 2021.

PRADAL, C. *et al.* OpenAlea: a visual programming and component-based software platform for plant modelling. **Functional Plant Biology**, v. 35, p. 751-760, 2008.

PRUSINKIEWICZ, P.; LINDENMAYER, A. The algorithmic beauty of plants. **Springer-Verlag**, New York, 1990.

QI, Y.; HEISLER, G. M.; GAO, W.; VOGELMANN, T. C.; BAI, S. **Characteristics of UV-B Radiation Tolerance in Broadleaf Trees in Southern USA**. Springer, Berlin, Heidelberg, 2010. https://doi.org/10.1007/978-3-642-03313-1_18

RAO, M. *et al.* Assessing the relationship among urban trees, nitrogen dioxide, and respiratory health. **Environmental Pollution**, v. 194, p. 96-104, 2014.

RAUMONEN, P. *et al.* Fast Automatic Precision Tree Models from Terrestrial Laser Scanner Data. **Remote Sensing**, v. 5, p. 491-520, 2013. DOI: 10.3390/rs5020491.

RECKZIEGEL, R. B. *et al.* Modelling and Comparing Shading Effects of 3D Tree Structures with Virtual Leaves. **Remote Sensing**, v. 13, p. 1-22, 2021 DOI: 10.3390/rs13030532.

REFFYE, P. *et al.* Plant models faithful to botanical structure and development. **Computer Graphics**, v. 22, p. 151-158, 1988.

REINHART, C. F. *et al.* Lean buildings: energy efficient commercial buildings in Germany. In: ACEEE SUMMER STUDY ON ENERGY EFFICIENCY IN BUILDINGS, 3., 2000, Pacific Grove. Anais [...]. Pacific Grove: ACEEE, 2000. p. 3287 - 3298.

REINHART, C.; WALKENHORST, O. Validation of dynamic RADIANCE-based daylight simulations for a test office with external blinds. **Energy and Buildings**, Freiburg, v. 33, n. 1, p. 683-697, 2001.

REINHART, C. F.; MARDALJEVIC, J.; ROGERS, Z. Dynamic daylight performance metrics for sustainable building design. **Leukos**, v. 3, n. 1, p. 7-31, 2006.

REINHART, C. F.; ANDERSEN, M. Development and validation of a Radiance model for a translucent panel. **Energy Build.**, v. 38, n. 7, p. 890-904, 2006. DOI: 10.1016/j.enbuild.2006.03.006.

REINHART, C. F.; BRETON, P.F. Experimental validation of Autodesk 3ds Max Design

2009 and Daysim 3.0. **Leukos**, v. 6, n. 1, p. 7-35, 2009.

REINHART, C. F.; WIENOLD, J. The daylighting dashboard – A simulation-based design analysis for daylight spaces. **Building and Environment**, v. 46, n. 2, p. 386-396, 2011. ISSN 0360-1323.

REINHARD, E. *et al.* **High Dynamic Range Imaging: acquisition, display and image-based lighting**. San Francisco: Morgan Kaufmann, 2005.

RIGITANO, R. Z. **A influência da vegetação no conforto térmico do ambiente construído**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da UNICAMP, Campinas-SP, 2004.

R. PANDIT, M.; POLYAKOR, R.; SADLER. The importance of tree cover and neighbourhood parks in determining urban property values. **56° AARES annual conference**, Australia, 2012.

ROGGE, E.; NEVENS, F.; GULINCK, H. Perception of rural landscapes in Flanders: Looking beyond aesthetics. **Landscape and Urban Planning**, v. 82, n. 4, p. 159–174, 2007.

ROSELL, J.R.; SANZ R. A review of methods and applications of the geometric characterization of tree crops in agricultural activities. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 81, p. 124-141, 2012. DOI: 10.1016/j.compag.2011.09.007.

ROY, S.; BYRNE, J.; PICKERING, C. A systematic quantitative review of urban tree benefits, costs, and assessment methods across cities in different climatic zones. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 11, p. 351-363, 2012.

RUCK, N. C. *et al.* Daylight in Buildings – A source book in daylighting buildings and components. Berkeley: The Lawrence Berkeley **National Laboratory**, 2000. Disponível em: <file:///C:/Users/Eliana/Downloads/dissertacao-desbloqueado.pdf.> Acesso em: 10 mar. 2022.

SAARINEN, N. *et al.* Urban-tree-attribute update using multisource single-tree inventory. **Forests**, v. 5, p. 1032-1052, 2014.

SAFARI, S. *et al.* Medicina de Emergência Baseada em Evidências. Parte 5, Curva Operacional do Receptor e Área sob a Curva. **Emergência**, v. 4, n. 2, p. 111-113, 2016.

SALAMÍ, E.; BARRADO, C.; PASTOR, E. UAV flight experiments applied to the remote sensing of vegetated áreas. **Remote Sensing**, v. 6, p. 11051-11081, 2014.

SALATA, F. *et al.* Relating microclimate, human thermal comfort and health during heat waves: An analysis of heat island mitigation strategies through a case study in an urban outdoor environment. **Sustainable Cities and Society**, v. 30, p. 79-96, 2017.

SALIM, S. M. *et al.* Large eddy simulation of the aerodynamic effects of trees on pollutant concentrations in street canyons. **Procedia Environ. Sci.**, v. 4, p. 17-24, 2011.

SANESI, G.; CHIARELLO, F. Residents and urban green spaces: The case of Bari. **Urban**

Foetry & Urban Greening, v. 4, p. 125-134, 2006.

SARLIKIOTI, V.; VISSER, P. H. B.; MARCELIS, L. F. M. Exploring the spatial distribution of light interception and photosynthesis of canopies by means of a functional-structural plant model. **Annals of Botany**, v. 107, p. 875–883, 2011. DOI: 10.1093/aob/mcr006.

SATTTLER, M. A.; SHARPLES, S.; PAGE, J. K. The geometry of the shading of buildings by various tree shapes. **Solar Energy**, v. 38, n. 03, p. 187-201, 1987.

SAXENA, M.; WARD, G. J.; PERRY, T.; HESCHONG, L.; HIGA, R. Dynamic Radiance–Predicting annual daylighting with variable fenestration optics using BSDFs. **In: Proceedings of the Fourth National Conference of IBPSA-USA**. New York, 2010. p. 402–409.

SCHILLER, M. (Ed). **Simulating daylight with architectural models**. Daylighting Network of North America, University of Southern California, Los Angeles, 1987.

SCUDO, G. Thermal comfort in green spaces. **In: Green structures and urban planning**. Milan, 2002. Disponível em: <<http://www.greenstructureplanning.eu/COSTC11/comfort.htm>> Acesso em: 25 Mar. 2022

SEAMANS, G. S. Mainstreaming the environmental benefits of street trees. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 12, p. 2-11, 2013.

SHAH, A. M. *et al.* Assessing environmental services and disservices of urban street trees: an application of emergy accounting. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 186, p. 106563, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106563>> Acesso em: 13 Abr. 2022.

SHAHBAZI, M.; THÉAU, J.; MÉNARD, P. Recent applications of unmanned aerial imagery in natural resource management. **GIScience & Remote Sensing**, p. 339-365, 2014. DOI: 10.1080/15481603.2014.926650.

SHASHUA-BAR, L.; HOFFMAN, M. E. Vegetation as a climatic component in the design of an urban street An empirical model for predicting the cooling effect of urban green areas with trees. **Energy and Buildings**, Haifa, v. 31, p. 221–235, 2002.

SLINEY, D. H. Physical factors in cataractogenesis: Ambient ultraviolet radiation and temperature. **Investigative Ophthalmology and Visual Science**, v. 27, n. 5, p. 781–790, 1986.

SILVA, C. O. *et al.* Between tree lovers and tree haters. Drivers of public perception regarding street trees and its implications on the urban green infrastructure planning. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 37, 2019.

SINOQUET, H. *et al.* Simple equations to estimate light interception by isolated trees from canopy structure features: Assessment with three-dimensional digitized apple trees. **New Phytologist**, v. 175, n. 1, p. 94–106, 2007.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE ARBORIZAÇÃO URBANA (SBAU). Carta a Londrina e Ibiporã. **Boletim Informativo**, v. 3, n. 5, p. 1-3, 1996.

SONG, H. *et al.* Association between Urban Greenness and Depressive Symptoms: Evaluation of Greenness Using Various Indicators. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 16, 2018.

SOARES, A. L. *et al.* Benefits and costs of street trees in Lisbon, Portugal. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 10, n. 2, 2011, p. 69-78. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ufug.2010.12.001>> Acesso em: 23 fev. 2022.

SOLEMMA. 2020. ClimateStudio. Disponível em: <<https://www.solemma.com/ClimateStudio.html>> Acesso em 21 Ago. 2020.

SPIEKERMANN, R. I. *et al.* Quantifying effectiveness of trees for landslide erosion control. **Geomorphology**, v. 396, 2022.

SUÁREZ, J. C. *et al.* Use of airborne LiDAR and aerial photography in the estimation of individual tree heights in forestry. **Computers & Geosciences**, v. 31, p. 253-262, 2005. DOI: 10.1016/j.cageo.2004.09.015.

SUK, J. Y.; SCHILER, M.; KENSEK, K. Investigation of existing discomfort glare indices using human subject study data. **Building and Environment**, v. 113, p. 121-130, 2017. ISSN 0360-1323. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.09.018>> Acesso em: 23 fev. 2022.

SZOKOLAY, S. V. **Environmental science handbook**. Lancaster: The Construction Press, 1980.

TAN, C.L.; WONG, N.H.; JUSUF, S.K. Outdoor mean radiant temperature estimation in the tropical urban environment. **Build. Environ.**, v. 64, p. 118-129, 2013.

THANACHAREONKIT, A.; SCARTEZZINI, J. L.; ANDERSEN, M. Comparing daylighting performance evaluation of buildings in scale models and test modules. **Solar Energy**, v. 79, n. 2, p. 168-182, 2005.

TAO, S. *et al.* Segmenting tree crowns from terrestrial and mobile LiDAR data by exploring ecological theories. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 110, p. 66-76, 2015. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2015.10.007.

TAKANO, T.; NAKAMURA, K.; WATANABE, M. Urban residential environments and senior citizens' longevity in megacity areas: the importance of walkable green spaces, **Epidemiol Community Health**, v. 56, 2002.

TESHNEHDEL, S. *et al.* Effect of tree cover and tree species on microclimate and pedestrian comfort in a residential district in Iran, **Building and Environment**, v. 178, 2020.

TEIXEIRA, W. Softwares para iluminação: passaporte de entrada para novos mercados profissionais. **LUME Arquitetura**, ed. 07, 2004. Disponível em: <https://www.lumearquitetura.com.br/pdf/ed07/ed_07_Ponto.pdf> Acesso em: 15 jul. 2022.

TOOKE, T. R. *et al.* Tree structure influences on rooftop-received solar radiation. **Landscape**

and Urban Planning, v. 102, n. 2, p. 73–81, 2011.

TORRES-SÁNCHEZ, J. *et al.* High-throughput 3-D monitoring of agricultural-tree plantations with unmanned aerial vehicle (UAV) technology. **PLoS One**, v. 10, 2015.

TREGENZA, P.; WILSON, M. **Daylighting: architecture and lighting design**. London: Routledge, 2011. 304 p.

TSUCHIYA, K.; OKURO, T.; TAKEUCHI, K. The combined effects of conservation policy and co-management alter the understory vegetation of urban woodlands: A case study in the Tama Hills area, Japan. **Landscape and Urban Planning**, v. 110, n. 1, p. 87–98, 2013.

TSOKA, S.; TSIKALOUDAKI, A.; THEODOSIOU, T. Analyzing the ENVI-met microclimate model's performance and assessing cool materials and urban vegetation applications—a review. **Sustain. Cities Soc.**, v. 43, p. 55-76, 2018.

TUOMINEN, S. *et al.* Improving Finnish multi-source National Forest Inventory by 3D aerial imaging. **Silva Fennica**, v. 51, 2009.

TYRVÄINEN, L. *et al.* Benefits and Uses of Urban Forests and Trees. **Urban Forests and Trees**. Springer, Berlin, Heidelberg, 2005.

ULLMAN, S. The interpretation of structure from motion. Proceedings of the Royal Society of London Série B: **Biological Sciences**, v. 203, p. 405 – 442, 1979. DOI: 10.1098/rspb.1979.0006.

ULLRICH, S. E.; NGHIEM, D. X.; KHASKINA, P. Suppression of an established immune response by UVA - A critical role for mast cells. **Photochemistry and Photobiology**, v. 83, n. 5, p. 1095–1100, 2007.

VAILSHERY, L. S.; JAGANMOHAN, M.; NAGENDRA, H. Effect of street trees on microclimate and air pollution in a tropical city, **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 12, p. 408-415, 2013.

VAN DEN WYMELLENBERG, K. G.; INANICI, M. N.; JOHNSON, P. W. The effect of luminance distribution patterns on occupant preference in a daylit office environment. **Leukos**, v. 7, n. 2, p. 103-122, 2010. ISSN 1550-2724.

VAN DILLEN, S. M. E.; VRIES, S.; GROENEWEGEN, P. P. Greenspace in urban neighbourhoods and residents' health: adding quality to quantity. **Epidemiol Community Health**, v. 8, p. 1 – 5, 2012. DOI:10.1136/jech.2009.104695

VAN DEN WYMELLENBERG, K.; INANICI, M. Evaluating a New Suite of Luminance-Based Design Metrics for Predicting Human Visual Comfort in Offices with Daylight. **Leukos**, v. 00, p. 1-26, 2015. ISSN 1550-2724. DOI: 10.1080/15502724.2015.1062392.

VAN DEN WYMELLENBERG, K.; INANICI, M. Evaluating a New Suite of Luminance-Based Design Metrics for Predicting Human Visual Comfort in Offices with Daylight. **Leukos**, 2014. DOI: 10.1080/15502724.2015.1062392.

VOGT, J. M.; HAUER, R. J.; FISCHER, B. C. The costs of maintaining and not maintaining the urban forest: a review of the urban forestry and arboriculture literature, **Arboriculture Urban Forest**, v. 41, p. 293-323, 2015.

VONDERACH, C.; VOEGTLE, T.; ADLER, P. Voxel-based approach for estimating urban tree volume from terrestrial laser scanning data. **Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 39, p. 451-456, 2012.

VOS, J. *et al.* Functional–structural plant modelling: a new versatile tool in crop science. **Journal of Experimental Botany**, v. 61, p. 2101-2115, 2010.

VOS, P. E. J. *et al.* Improving local air quality in cities: to tree or not to tree? **Environ. Pollut.**, v. 183, p. 113-122, 2012.

VOSS, K. *et al.* Towards lean buildings: examples and experience from a German demonstration program for energy efficiency and solar energy use in commercial buildings. In: ISES EUROPE SOLAR CONGRESS, 3., 2000, Freiburg. Anais [...]. Freiburg: ISES, 2000. p. 38-46.

VILLALBA, A.; PATTINI, A.; CORREA, E. An approach to urban tree daylight permeability simulation using models based on louvers. **Building and Environment**, Mendoza, v. 73, p. 75-87, Feb. 2014.

VIVANCO-HIDALGO, R. M. *et al.* Association of residential air pollution, noise, and greenspace with initial ischemic stroke severity. **Environmental Research**, v. 179, Part A, 2019.

WALLACE, L. *et al.* Development of a UAV-LiDAR System with Application to Forest Inventory. **Remote Sensing**, v. 4, p. 1519-1543, 2012. DOI: 10.3390/rs4061519.

WALLACE, L. *et al.* Assessment of Forest Structure Using Two UAV Techniques: A Comparison of Airborne Laser Scanning and Structure from Motion (SfM) Point Clouds. **Forests**, v. 7, p. 1 – 16, 2016. DOI: 10.3390/f7030062.

WALSH, J.W.T. The early years of illuminating engineering in Great Britain. **Trans Illum Eng Soc**, v. 15, n. 3, p. 49-60, 1951.

WANG, X. *et al.* Street Trees in a Chinese Forest City: Structure, Benefits and Costs. **Sustainability**, v. 10, n. 3, 2018, p. 674. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/su10030674>> Acesso em: 20 Nov. 2020.

WANG, Y.; NI, Z.; CHEN, S.; XIA, B. Microclimate regulation and energy saving potential from different urban green infrastructures in a subtropical city. **Journal of Cleaner Production**, v. 226, p. 913-927, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.114>> Acesso em: 20 maio. 2023.

WANG, Z.; ZHAO, X.; YANG, J.; JIYUN SONG, J. Cooling and energy saving potentials of shade trees and urban lawns in a desert city. **Applied Energy**, v. 161, p. 437-444, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.047>> Acesso em: 20 maio. 2023.

- WARD, G. Photosphere [software]. Disponível em: <<http://anyhe.com>> Acesso em: 10 set. 2020.
- WARD, G. Photosphere for Mac. Los Angeles: Anywhere software, 2003.
- WARD, G. Findglare command (Radiance). 1998.
- WARD, G. Photosphere. 2016. Disponível em: <<http://www.anywhere.com/>> Acesso em: 20 Nov. 2020.
- WARD, G. Radiance. 1987. Disponível em: <<https://radiance-online.org/>> Acesso em: 20 Nov. 2020.
- WARD, G. hdrgen. Disponível em: <<http://www.anywhere.com/>> Acesso em: 20 Nov. 2020.
- WESTOBY, M. J. *et al.* Structure-from-motion photogrammetry: a low-cost, effective tool for geoscience applications. **Geomorphology**, v. 179, p. 300-314, 2012.
- WHITE, J. C. *et al.* The Utility of Image-Based Point Clouds for Forest Inventory: A Comparison with Airborne Laser Scanning. **Forests**, v. 4, p. 518-536, 2013. DOI:10.3390/f4030518.
- WIENOLD, J., CHRISTOFFERSEN, J. Towards a new daylight glare rating, **In:** Proceedings of the 10th European Lighting Conference, Lux Europa 2005. Berlin (DE), 2005. p. 157–161.
- WOLF, K. *et al.* Diversity in public perceptions of urban forests and urban trees: A critical review. **Landscape and Urban Planning**, v. 226, 2022, p. 104466. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2022.104466>> Acesso em: 28 Jun. 2020.
- WOLSKA, A.; SAWICKI, D. Practical application of HDRI for discomfort glare assessment at indoor workplaces, **Measurement**, v. 151, p. 1 – 9, 2020.
- WOLF, K. L. *et al.* Urban Trees and Human Health: A Scoping Review. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 17, n. 12, 2020.
- WONG, N.H.; STEVE, K.J. Air temperature distribution and the influence of sky view factor in a green Singapore estate. **J. Urban Plann. Dev.** v.136, n.3, p.261-272, 2010.
- WOOTTON-BEARD, P. C.; XING, Y.; PRABHAKARAN, R. T. D.; ROBSON, P.; BOSCH, M.; THORNTON, J. M.; GRAHAM A. ORMONDROYD, G. A.; JONES, P.; DONNISON, J. Review: Improving the Impact of Plant Science on Urban Planning and Design. **Buildings**, v. 6, 2016. DOI:10.3390/buildings6040048
- WU, B. *et al.* A voxel-based method for automated identification and morphological parameters estimation of individual street trees from mobile laser scanning data. **Remote Sensing**, v. 5, p. 584-611, 2013.
- YAHIA, M.W.; JOHANSSON, E. Landscape interventions in improving thermal comfort in the hot dry city of Damascus, Syria—The example of residential spaces with detached buildings. **Landscape and Urban Planning**, v. 125, p. 1-16, 2014.

YAN, H. et al. Influence of view factors on intra-urban air temperature and thermal comfort variability in a temperate city. **Science of The Total Environment**, v. 841, p. 156-720, 2022.

YANG, X.; MILLER, D. R.; MONTGOMERY, M. E. Vertical distributions of canopy foliage and biologically active radiation in a defoliated/refoliated hardwood forest. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 67, n. 1–2, p. 129–146, 1993.

YAO, W.; WEI, Y. Detection of 3-D Individual Trees in Urban Areas by Combining Airborne LiDAR Data and Imagery. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 10, n. 6, p. 1355-1359, nov. 2013. DOI: 10.1109/LGRS.2013.2241390.

YATES, D.; McKENNAN, G. Solar Architecture and Light Attenuation by trees: Conflict or Compromise? **Arboricultural Journal**. v. 13, p. 7-16, 1989.

YOSHIMURA, H. *et al.* Spectral properties of plant leaves pertaining to urban landscape design of broad-spectrum solar ultraviolet radiation reduction. **International Journal of Biometeorology**, v. 54, n. 2, p. 179–191, 2010.

YU, C.; HIEN, W. N. Thermal Benefits of City Parks. **Energy and Buildings**, v. 38, p. 105-120, 2006.

ZHANG, B.; XIE, G.; ZHANG, C.; ZHANG, J. The economic benefits of rainwater-runoff reduction by urban green spaces: A case study in Beijing, China, **Journal of Environmental Management**, v. 100, p. 65-71, 2012.

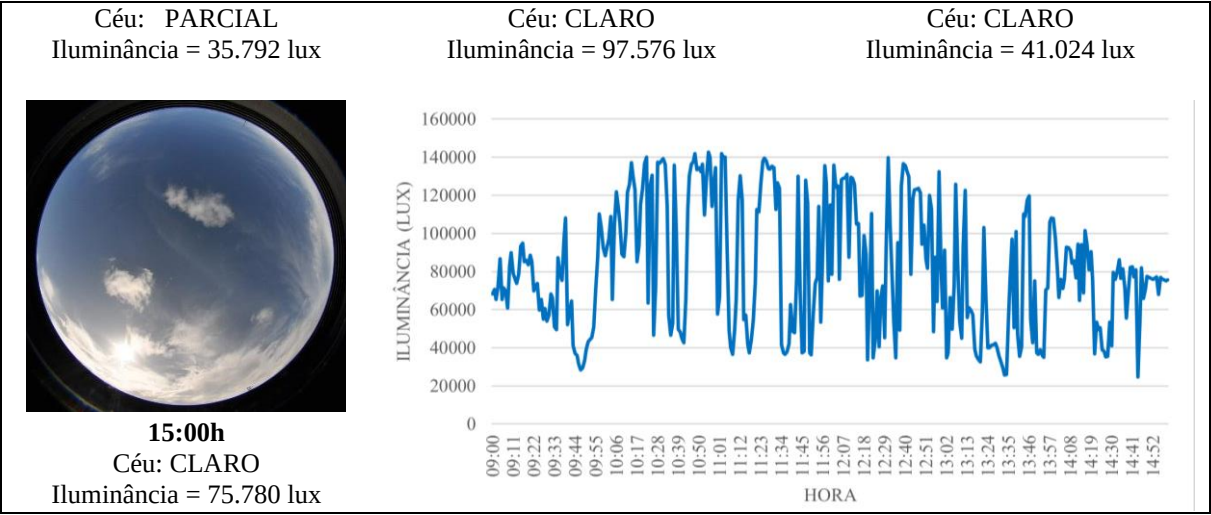
ZHAO, N. *et al.* Tree characteristics and environmental noise in complex urban settings – A case study from Montreal, Canada. **Environmental Research**, v. 202, 2021.

ZINE-EL-ABIDINE, M. *et al.* Assigning apples to individual trees in dense orchards using 3D colour point clouds. **Biosystems Engineering**, v. 209, p. 30-52, 2021. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2021.06.015.

APÊNDICE A

Registros fotográficos do céu durante as medições *in loco* – classificação do tipo de céu

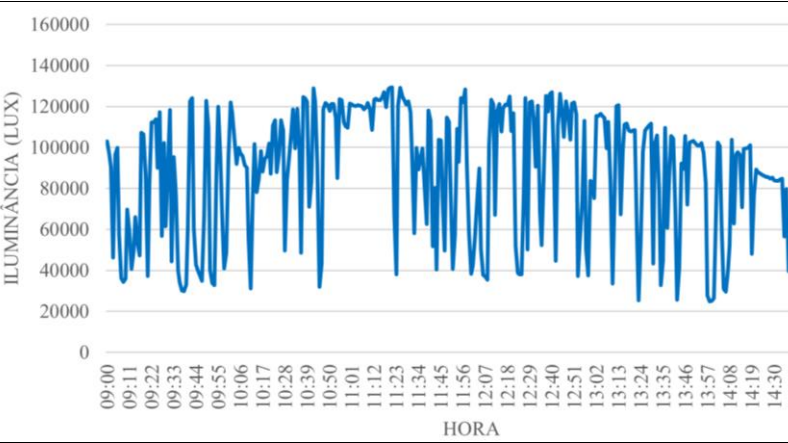
DATA: 18/02/2022		
9:00h Céu: Iluminância =	 9:30h Céu: ENCOBERTO Iluminância = 57.171 lux	 10:00h Céu: ENCOBERTO Iluminância = 88.449 lux
 10:30h Céu: PARCIAL Iluminância = 137.840 lux	 11:00h Céu: PARCIAL Iluminância = 57.585 lux	 11:30h Céu: PARCIAL Iluminância = 134.410 lux
 12:00h Céu: PARCIAL Iluminância = 114.890 lux	 12:30h Céu: PARCIAL Iluminância = 94.143 lux	 13:00h Céu: PARCIAL Iluminância = 60.961 lux
 13:30h	 14:00h	 14:30h



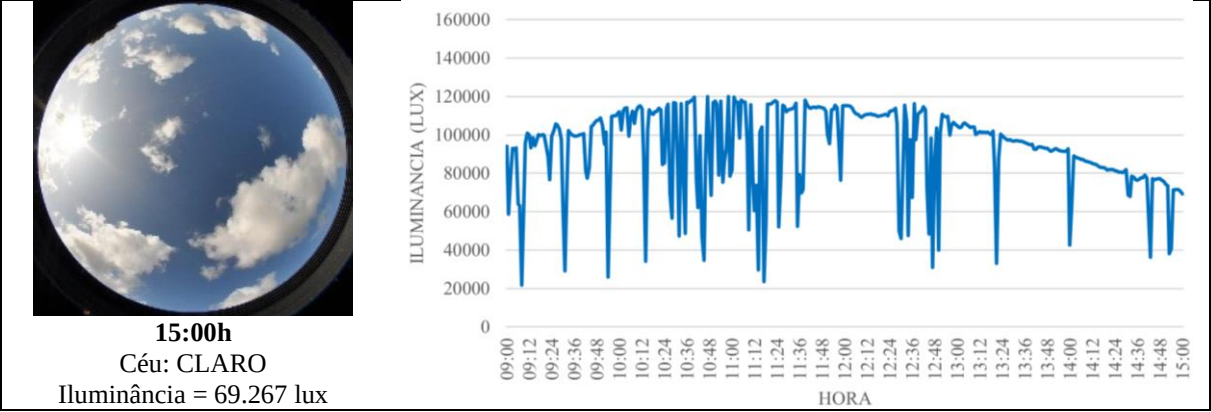
DATA: 21/02/2022		
		
9:00h Céu: PARCIAL Iluminância = 102.880 lux	9:30h Céu: PARCIAL Iluminância = 118.290 lux	10:00h Céu: PARCIAL Iluminância = 121.970 lux
		
10:30h Céu: PARCIAL Iluminância = 118.690 lux	11:00h Céu: CLARO Iluminância = 120.880 lux	11:30h Céu: CLARO Iluminância = 99.712 lux
		
12:00h Céu: PARCIAL Iluminância = 121.070 lux	12:30h Céu: CLARO Iluminância = 120.530 lux	13:00h Céu: CLARO Iluminância = 115.300 lux
		
13:30h Céu: CLARO Iluminância = 105.860 lux	14:00h Céu: CLARO Iluminância = 102.360 lux	14:30h Céu: CLARO Iluminância = 83.781 lux



15:00h
Céu: CLARO
Iluminância = 70.395 lux



DATA: 22/02/2022		
		
9:00h Céu: CLARO Iluminância = 94.078 lux	9:30h Céu: CLARO Iluminância = 63.840 lux	10:00h Céu: CLARO Iluminância = 102.610 lux
		
10:30h Céu: CLARO Iluminância = 116.560 lux	11:00h Céu: CLARO Iluminância = 116.940 lux	11:30h Céu: CLARO Iluminância = 113.380 lux
		
12:00h Céu: CLARO Iluminância = 115.290 lux	12:30h Céu: CLARO Iluminância = 45.891 lux	13:00h Céu: CLARO Iluminância = 103.920 lux
		
13:30h Céu: CLARO Iluminância = 97.034 lux	14:00h Céu: CLARO Iluminância = 63.483 lux	14:30h Céu: CLARO Iluminância = 80.558 lux



DATA: 25/02/2022



9:00h

Céu: EMCOBERTO
Iluminância = 87.371 lux



9:30h

Céu: PARCIAL
Iluminância = 96.022 lux



10:00h

Céu: PARCIAL
Iluminância = 48.519 lux



10:30h

Céu: PARCIAL
Iluminância = 35.041 lux



11:00h

Céu: PARCIAL
Iluminância = 116.920 lux



11:30h

Céu: PARCIAL
Iluminância = 78.776 lux



12:00h

Céu: PARCIAL
Iluminância = 127.370 lux



12:30h

Céu: PARCIAL
Iluminância = 61.660 lux



13:00h

Céu: PARCIAL
Iluminância = 101.710 lux



13:30h

Céu: PARCIAL
Iluminância = 39.448 lux



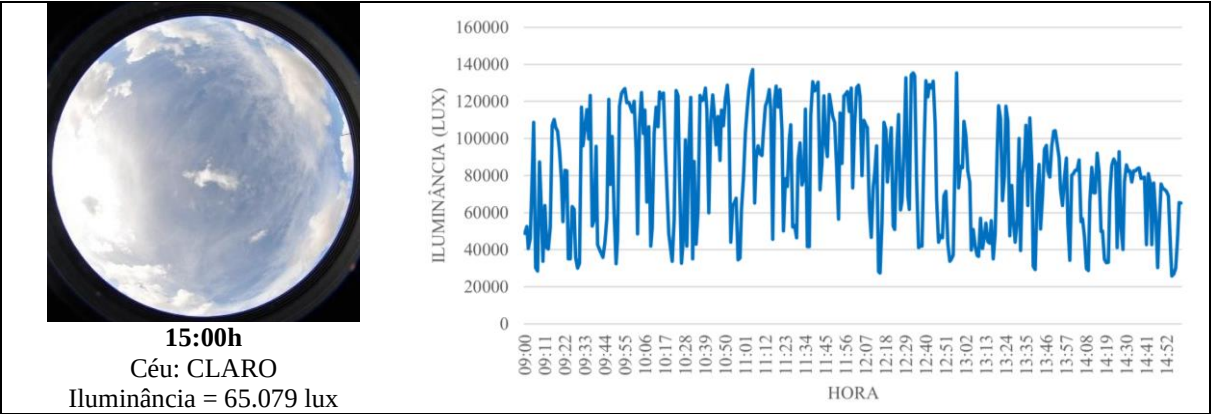
14:00h

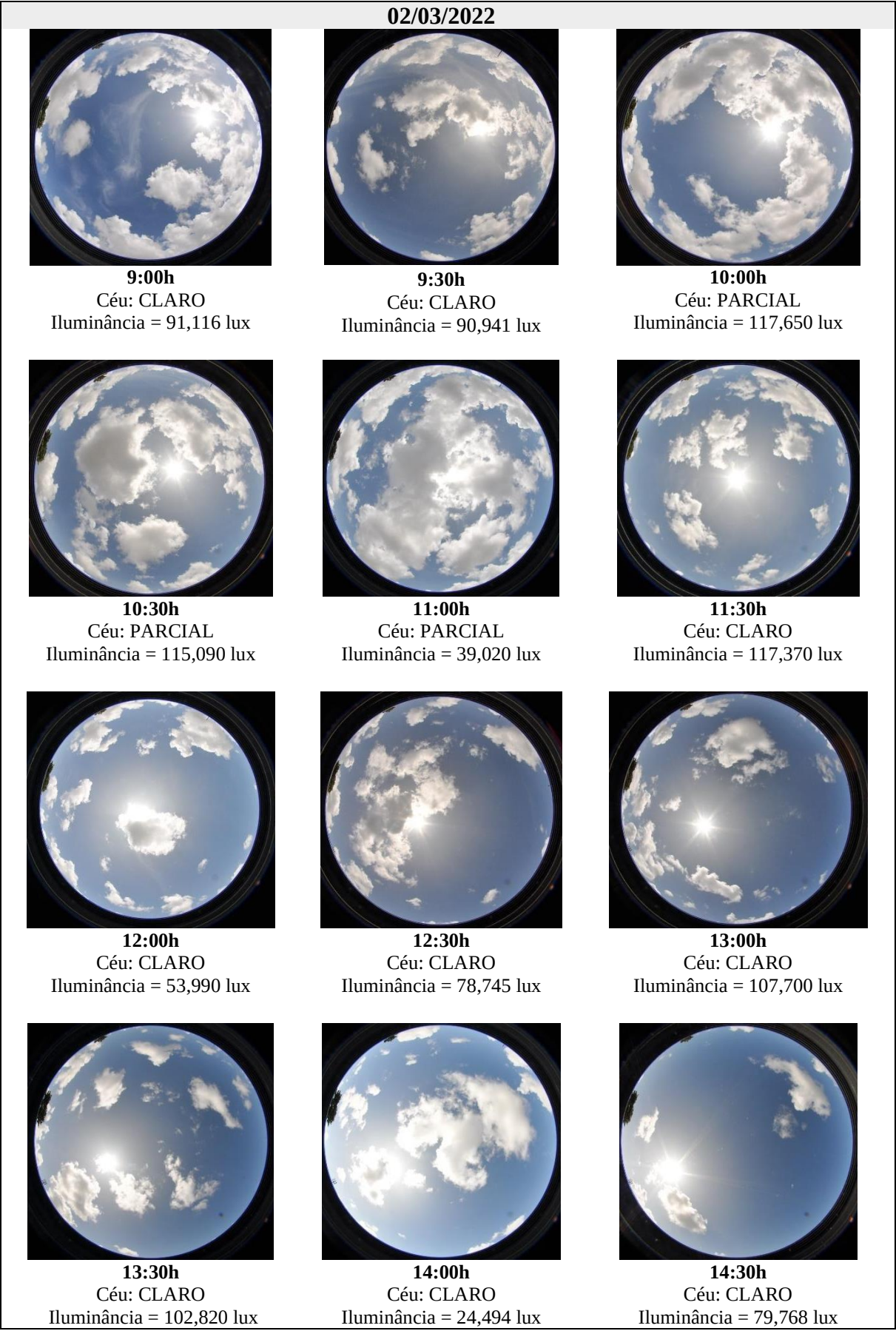
Céu: CLARO
Iluminância = 82.932 lux

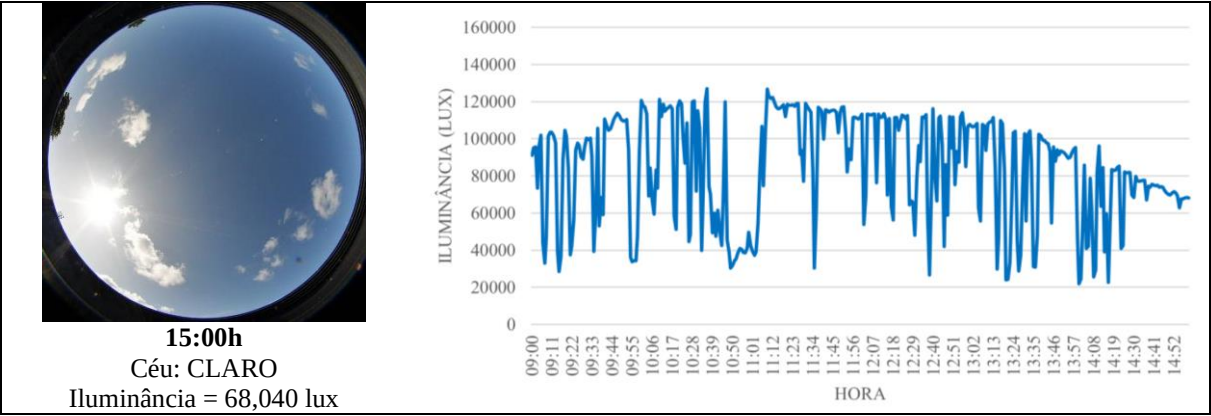


14:30h

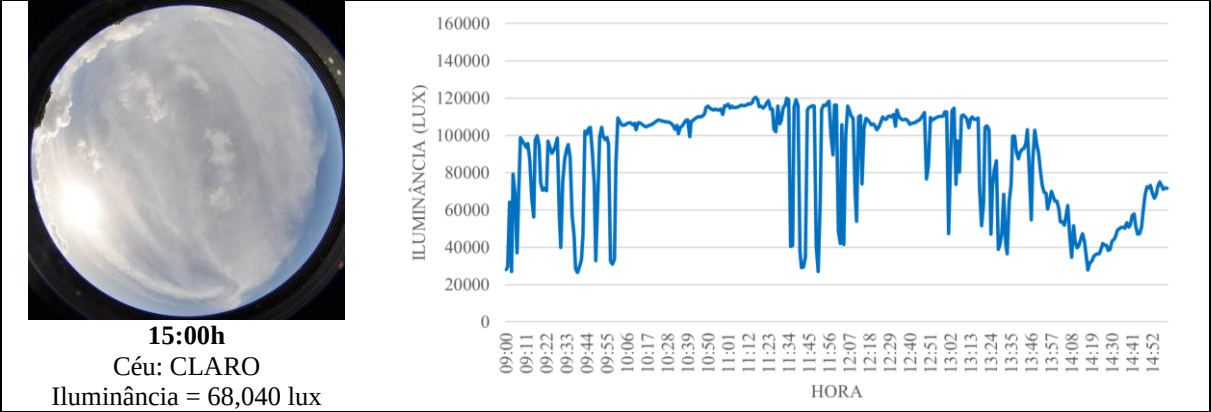
Céu: CLARO
Iluminância = 76.640 lux







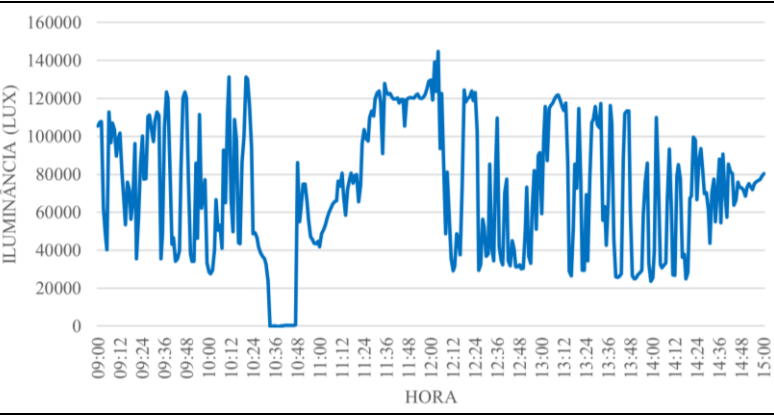
03/03/2022		
		
9:00h Céu: CLARO Iluminância = 36,997 lux	9:30h Céu: CLARO Iluminância = 92,815 lux	10:00h Céu: CLARO Iluminância = 109,510 lux
		
10:30h Céu: CLARO Iluminância = 106,450 lux	11:00h Céu: CLARO Iluminância = 116,780 lux	11:30h Céu: CLARO Iluminância = 106,100 lux
		
12:00h Céu: CLARO Iluminância = 116,170 lux	12:30h Céu: CLARO Iluminância = 104,920 lux	13:00h Céu: CLARO Iluminância = 113,370 lux
		
13:30h Céu: PARCIAL Iluminância = 41,184 lux	14:00h Céu: PARCIAL Iluminância = 60,435 lux	14:30h Céu: PARCIAL Iluminância = 43,401 lux

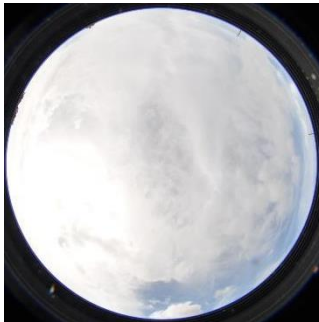


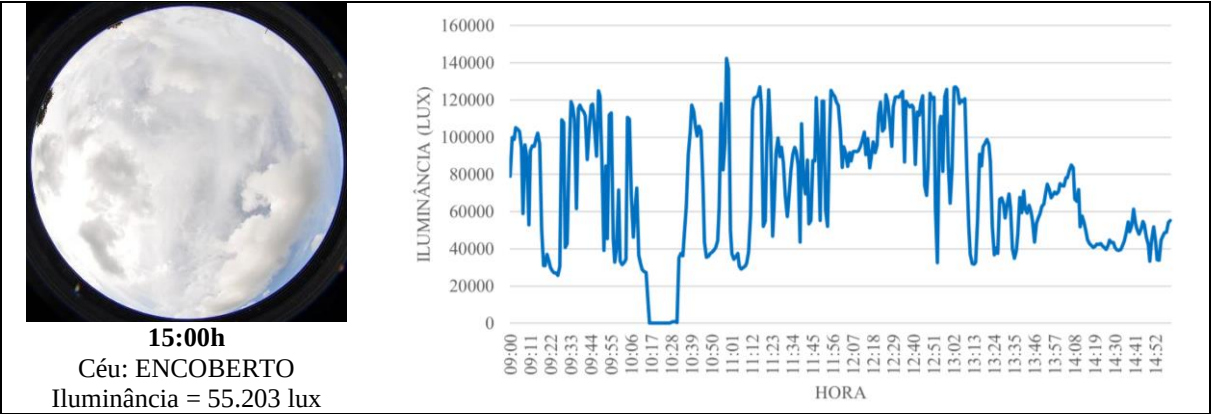
04/03/2022		
		
9:00h Céu: CLARO Iluminância = 105,460 lux	9:30h Céu: PARCIAL Iluminância = 112,770 lux	10:00h Céu: PARCIAL Iluminância = 27,722 lux
		
10:30h Céu: Iluminância = 35,425 lux	11:00h Céu: ENCOBERTO Iluminância = 41,982 lux	11:30h Céu: CLARO Iluminância = 127,850 lux
		
12:00h Céu: PARCIAL Iluminância = 123,580 lux	12:30h Céu: PARCIAL Iluminância = 85,452 lux	13:00h Céu: CLARO Iluminância = 87,213 lux
		
13:30h Céu: PARCIAL Iluminância = 55,916 lux	14:00h Céu: PARCIAL Iluminância = 78,030 lux	14:30h Céu: CLARO Iluminância = 70,546 lux

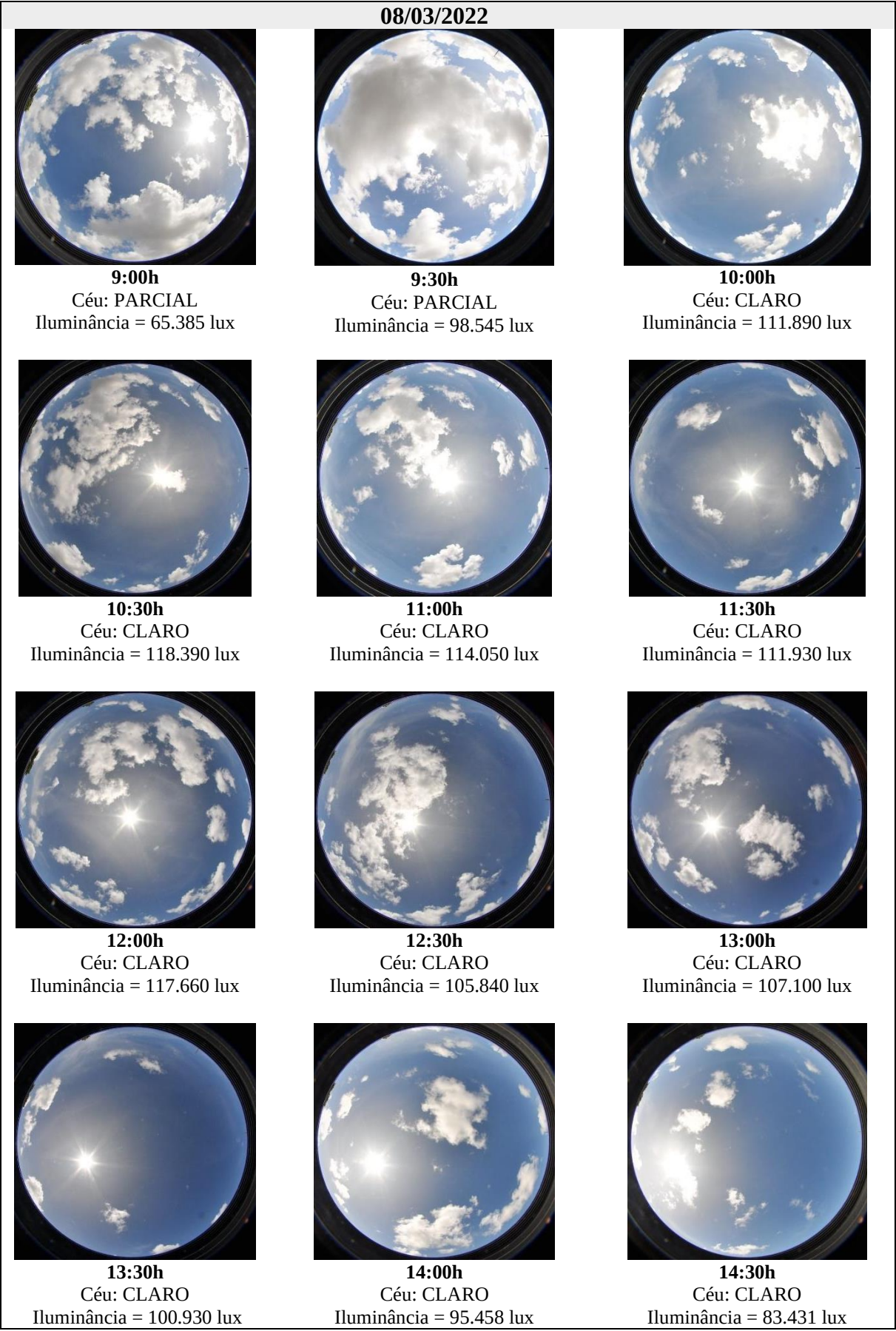


15:00h
Céu: CLARO
Iluminância = 80,485 lux



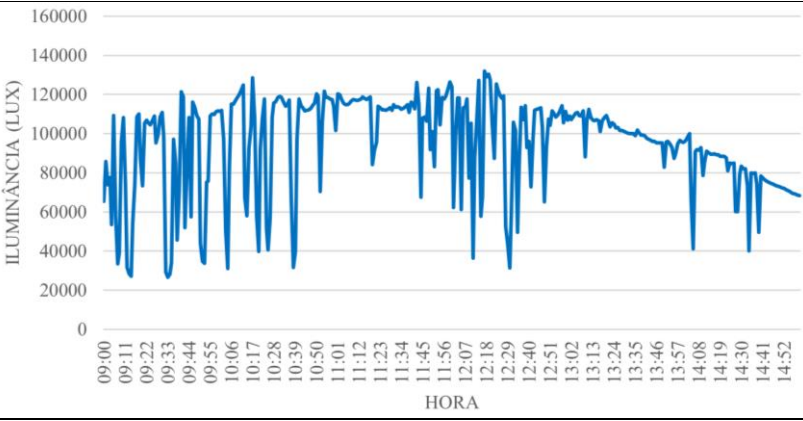
07/03/2022		
		
9:00h Céu: CLARO Iluminância = 103.110 lux	9:30h Céu: PARCIAL Iluminância = 40.831 lux	10:00h Céu: PARCIAL Iluminância = 31.484 lux
		
10:30h Céu: ENCOBERTO Iluminância = 35.307 lux	11:00h Céu: ENCOBERTO Iluminância = 37.365 lux	11:30h Céu: PARCIAL Iluminância = 66.736 lux
		
12:00h Céu: CLARO Iluminância = 123.160 lux	12:30h Céu: CLARO Iluminância = 121.710 lux	13:00h Céu: PARCIAL Iluminância = 127.100 lux
		
13:30h Céu: ENCOBERTO Iluminância = 62.509 lux	14:00h Céu: PARCIAL Iluminância = 73.951 lux	14:30h Céu: ENCOBERTO Iluminância = 39.551 lux



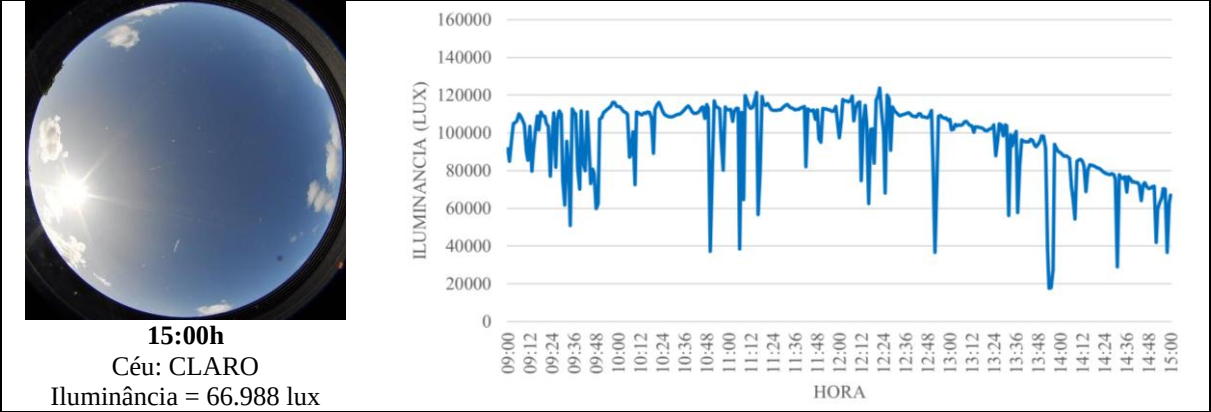




15:00h
Céu: CLARO
Iluminância = 68.256 lux



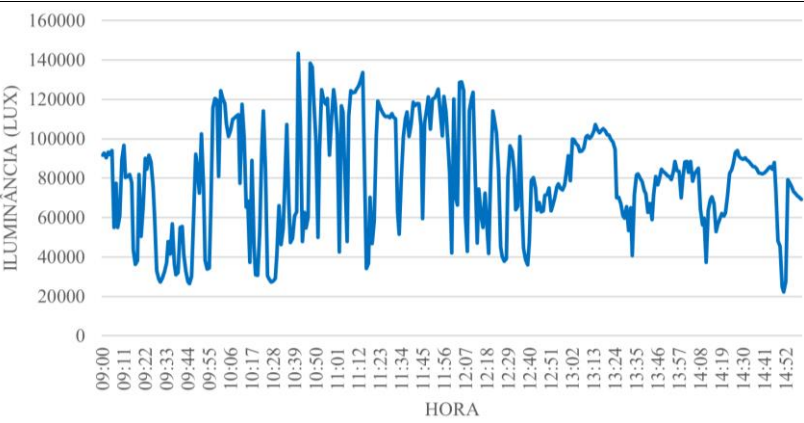
10/03/2022		
		
9:00h Céu: CLARO Iluminância = 90.220 lux	9:30h Céu: CLARO Iluminância = 80.881 lux	10:00h Céu: CLARO Iluminância = 114.040 lux
		
10:30h Céu: CLARO Iluminância = 109.830 lux	11:00h Céu: CLARO Iluminância = 112.020 lux	11:30h Céu: CLARO Iluminância = 115.100 lux
		
12:00h Céu: CLARO Iluminância = 116.900 lux	12:30h Céu: CLARO Iluminância = 109.780 lux	13:00h Céu: CLARO Iluminância = 101.900 lux
		
13:30h Céu: CLARO Iluminância = 56.148 lux	14:00h Céu: CLARO Iluminância = 87.801 lux	14:30h Céu: CLARO Iluminância = 76.585 lux



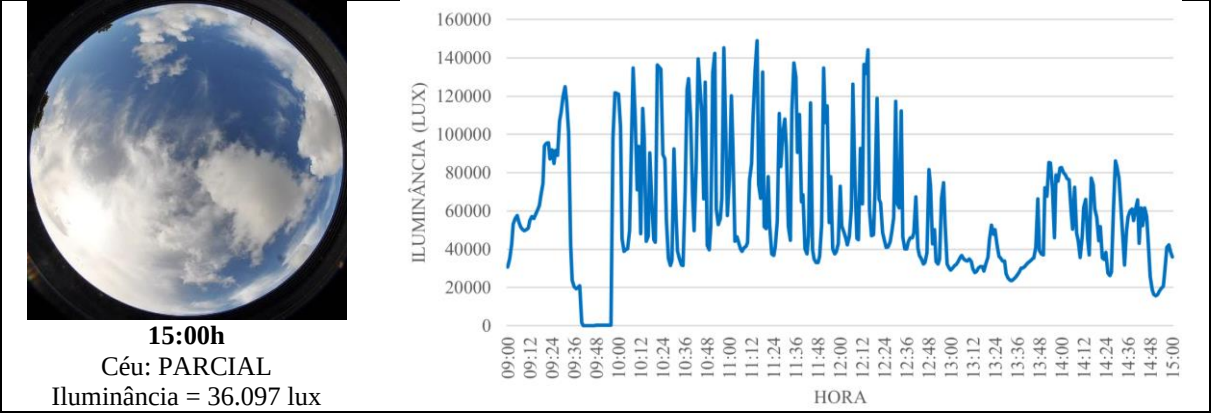
11/03/2022		
		
9:00h Céu: PARCIAL Iluminância = 91.788 lux	9:30h Céu: ENCOBERTO Iluminância = 32.515 lux	10:00h Céu: PARCIAL Iluminância = 120.540 lux
		
10:30h Céu: ENCOBERTO Iluminância = 66.011 lux	11:00h Céu: PARCIAL Iluminância = 102.500 lux	11:30h Céu: PARCIAL Iluminância = 62.950 lux
		
12:00h Céu: PARCIAL Iluminância = 69.817 lux	12:30h Céu: PARCIAL Iluminância = 63.999 lux	13:00h Céu: PARCIAL Iluminância = 78.852 lux
		
13:30h Céu: PARCIAL Iluminância = 64.933 lux	14:00h Céu: PARCIAL Iluminância = 83.085 lux	14:30h Céu: PARCIAL Iluminância = 89.425 lux



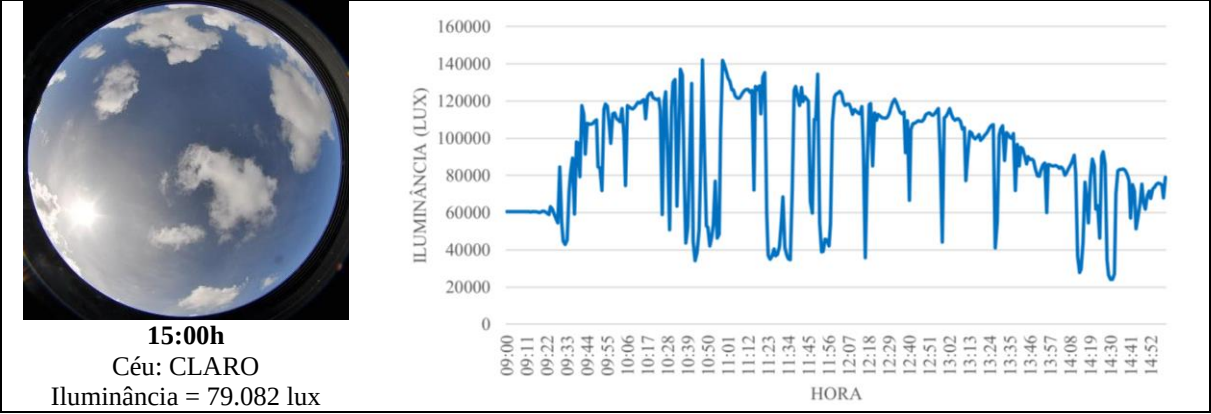
15:00h
Céu: CLARO
Iluminância = 69.142 lux

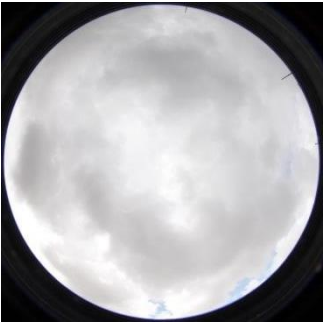


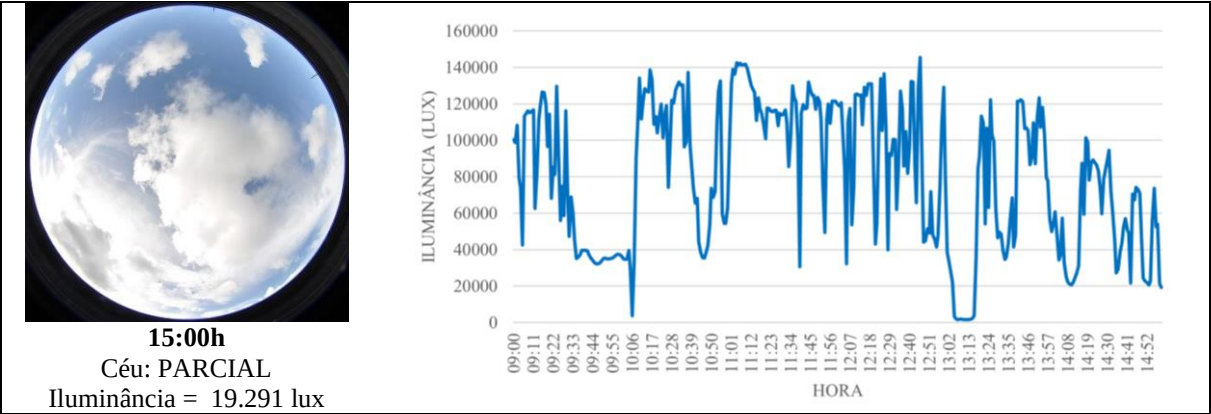
14/03/2022		
		
9:00h Céu: ENCOBERTO Iluminância = 53.178 lux	9:30h Céu: ENCOBERTO Iluminância = 119.840 lux	10:00h Céu: ENCOBERTO Iluminância = 121.460 lux
		
10:30h Céu: ENCOBERTO Iluminância = 92.543 lux	11:00h Céu: ENCOBERTO Iluminância = 93.086 lux	11:30h Céu: ENCOBERTO Iluminância = 108.130 lux
		
12:00h Céu: ENCOBERTO Iluminância = 38.509 lux	12:30h Céu: ENCOBERTO Iluminância = 112.270 lux	13:00h Céu: ENCOBERTO Iluminância = 35.591 lux
		
13:30h Céu: ENCOBERTO Iluminância = 24.313 lux	14:00h Céu: PARCIAL Iluminância = 78.742 lux	14:30h Céu: PARCIAL Iluminância = 77.143 lux



15/03/2022		
		
9:00h Céu: ENCOBERTO Iluminância = 60.491 lux	9:30h Céu: PARCIAL Iluminância = 54.437 lux	10:00h Céu: CLARO Iluminância = 108.820 lux
		
10:30h Céu: PARCIAL Iluminância = 63.542 lux	11:00h Céu: PARCIAL Iluminância = 126.170 lux	11:30h Céu: PARCIAL Iluminância = 41.201 lux
		
12:00h Céu: CLARO Iluminância = 123.910 lux	12:30h Céu: CLARO Iluminância = 121.140 lux	13:00h Céu: CLARO Iluminância = 116.060 lux
		
13:30h Céu: CLARO Iluminância = 106.800 lux	14:00h Céu: CLARO Iluminância = 84.849 lux	14:30h Céu: CLARO Iluminância = 27.086 lux



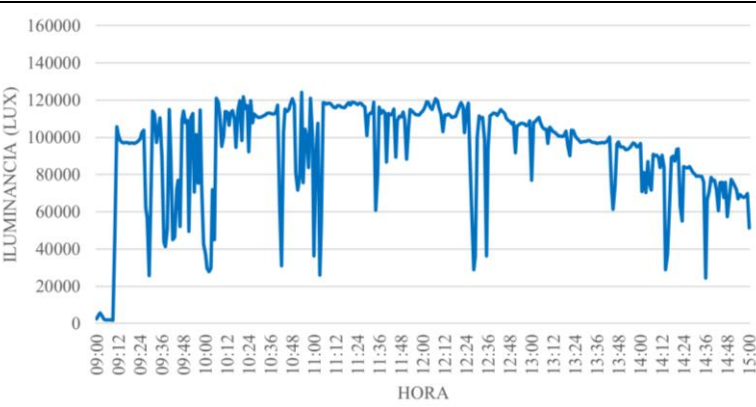
16/03/2022		
		
9:00h Céu: ENCOBERTO Iluminância = 100.320 lux	9:30h Céu: ENCOBERTO Iluminância = 68.913 lux	10:00h Céu: ENCOBERTO Iluminância = 36.380 lux
		
10:30h Céu: PARCIAL Iluminância = 132.120 lux	11:00h Céu: PARCIAL Iluminância = 136.290 lux	11:30h Céu: CLARO Iluminância = 101.950 lux
		
12:00h Céu: CLARO Iluminância = 118.790 lux	12:30h Céu: PARCIAL Iluminância = 100.770 lux	13:00h Céu: ENCOBERTO Iluminância = 33.056 lux
		
13:30h Céu: ENCOBERTO Iluminância = 39.309 lux	14:00h Céu: ENCOBERTO Iluminância = 60.791 lux	14:30h Céu: PARCIAL Iluminância = 89.731 lux



17/03/2022		
		
9:00h Céu: CLARO Iluminância = 102.650 lux	9:30h Céu: CLARO Iluminância = 112.290 lux	10:00h Céu: CLARO Iluminância = 71.851 lux
		
10:30h Céu: CLARO Iluminância = 111.570 lux	11:00h Céu: CLARO Iluminância = 91.305 lux	11:30h Céu: CLARO Iluminância = 113.030 lux
		
12:00h Céu: CLARO Iluminância = 114.280 lux	12:30h Céu: CLARO Iluminância = 99.873 lux	13:00h Céu: CLARO Iluminância = 108.250 lux
		
13:30h Céu: CLARO Iluminância = 97.703 lux	14:00h Céu: CLARO Iluminância = 96.813 lux	14:30h Céu: CLARO Iluminância = 80.012 lux



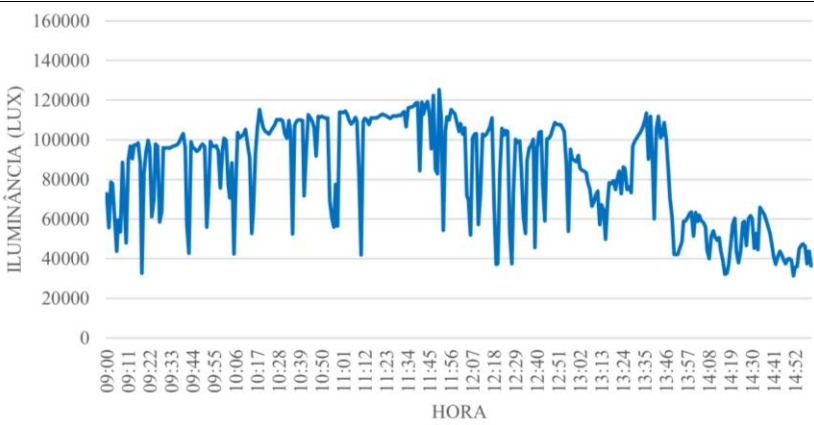
15:00h
Céu: CLARO
Iluminância = 51.230 lux



18/03/2022		
		
9:00h Céu: CLARO Iluminância = 78.729 lux	9:30h Céu: CLARO Iluminância = 95.998 lux	10:00h Céu: CLARO Iluminância = 100.860 lux
		
10:30h Céu: CLARO Iluminância = 109.710 lux	11:00h Céu: CLARO Iluminância = 113.890 lux	11:30h Céu: CLARO Iluminância = 118.640 lux
		
12:00h Céu: CLARO Iluminância = 108.140 lux	12:30h Céu: PARCIAL Iluminância = 85.767 lux	13:00h Céu: PARCIAL Iluminância = 85.856 lux
		
13:30h Céu: PARCIAL Iluminância = 99.542 lux	14:00h Céu: PARCIAL Iluminância = 63.567 lux	14:30h Céu: PARCIAL Iluminância = 60.344 lux



15:00h
Céu: PARCIAL
Iluminância = 36.473 lux



APÊNDICE B

Resultados das métricas de ofuscamento

		DGP	DGI	UGR	VCP	CGI			DGP	DGI	UGR	VCP	CGI	
NORTE	9:00 h	PTA	40,01%	19,99	24,98	4,34	31,08	9:00 h	PTA	36,40%	20,68	25,65	5,60	31,15
		PT	44,97%	20,41	25,62	0	32,45		PT	73,77%	23,37	29,62	0	37,03
		PSA	43,04%	21,17	26,29	2,13	32,82		PSA	71,49%	24,29	30,39	0	37,92
		PS	43,38%	20,07	25,24	0,89	31,83		PS	91,50%	27,08	33,85	0	40,65
	12:00 h	PTA	39,73%	20,11	25,03	8,97	30,89	12:00 h	PTA	27,97%	20,17	24,61	4,80	28,59
		PT	55,37%	21,77	27,29	0	34,88		PT	31,58%	21,01	25,98	1,91	30,73
		PSA	52,46%	22,05	27,45	0	34,90		PSA	29,04%	19,42	24,07	4,97	28,46
		PS	55,14%	22,15	27,635	0	35,22		PS	31,55%	21,37	26,22	5,26	30,92
	15:00 h	PTA	40,18%	20,13	25,305	1,68	31,39	15:00 h	PTA	29,89%	22,39	27,43	1,70	31,37
		PT	70,99%	24,20	30,455	0	37,67		PT	33,28%	22,41	27,95	3,50	32,67
		PSA	74,31%	24,17	30,61	0	37,75		PSA	31,23%	21,74	26,79	1,73	31,30
		PS	72,83%	24,05	30,40	0	37,59		PS	35,98%	24,11	29,54	3,20	34,61
SUL	9:00 h	PTA	25,48%	16,61	20,67	18,25	24,44	9:00 h	PTA	25,17%	17,63	21,73	22,69	25,45
		PT	27,66%	16,96	21,40	12,87	25,68		PT	28,19%	18,88	23,61	14,35	27,91
		PSA	26,39%	16,32	19,91	41,76	23,82		PSA	27,31%	18,74	23,54	8,95	27,58
		PS	29,00%	17,98	22,42	18,79	26,78		PS	30,48%	19,04	23,83	17,99	28,57
	12:00 h	PTA	30,13%	20,71	25,34	3,09	29,74	12:00 h	PTA	24,14%	16,04	19,92	24,15	23,48
		PT	29,16%	19,68	24,11	15,27	28,47		PT	28,41%	19,09	23,57	6,14	27,82
		PSA	28,80%	19,10	23,58	19,17	27,91		PSA	27,93%	18,28	22,72	9,20	26,90
		PS	31,23%	19,94	24,64	8,84	29,39		PS	29,38%	19,40	23,91	12,34	28,29
	15:00 h	PTA	29,11%	20,49	25,07	10,49	29,24	15:00 h	PTA	39,81%	20,91	26,16	3,63	32,26
		PT	30,25%	21,15	25,89	2,58	30,28		PT	72,00%	24,18	30,43	0	37,90
		PSA	28,82%	20,21	24,94	4,65	29,12		PSA	71,94%	24,67	30,88	0	38,44
		PS	30,08%	20,96	25,67	2,92	30,04		PS	74,94%	25,36	31,64	0	39,08

LEGENDA	DGP	DGI	UGR	VCP	CGI
Imperceptível	<0.30	<18	<13	80 - 100	<13
Perceptível	0.30 – 0.35	18 - 24	13 - 22	60 - 80	13 - 22
Perturbador	0.35 – 0.45	24 - 31	22 - 28	40 - 60	22 - 28
Intolerável	>0.45	>28	>28	<40	>28

*PTA – Pavimento térreo com árvore;

PT – Pavimento térreo sem árvore;

PSA – Pavimento superior com árvore;

PS – Pavimento superior sem árvore

** DGP – Daylight Glare Probability

DGI – Daylight Glare Index

URG – Unified Glare Rating

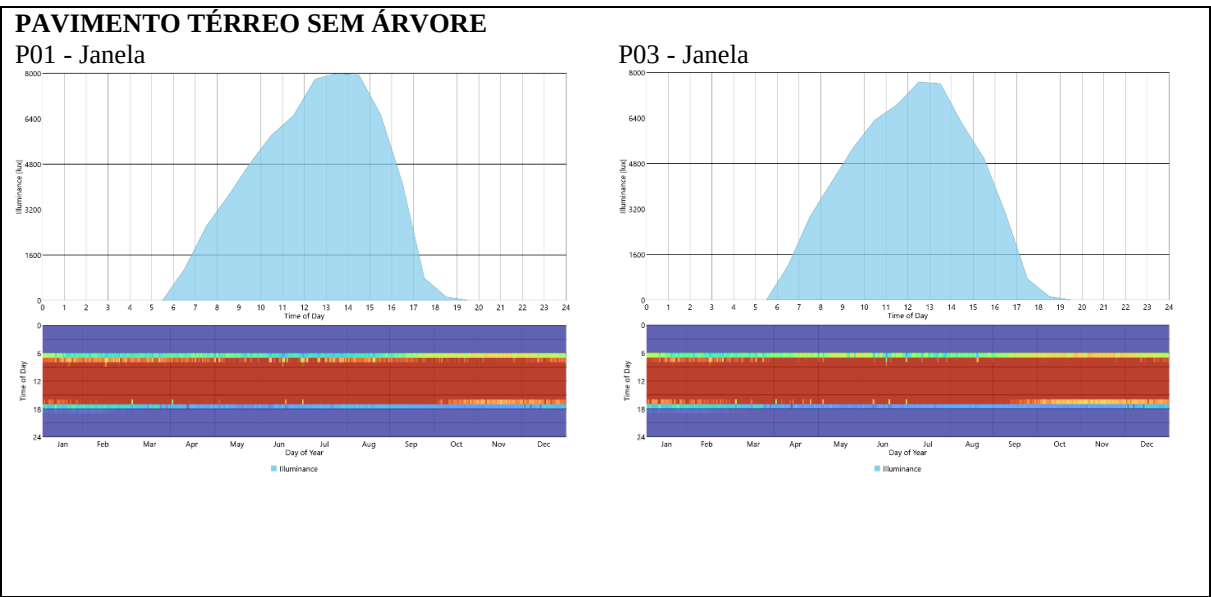
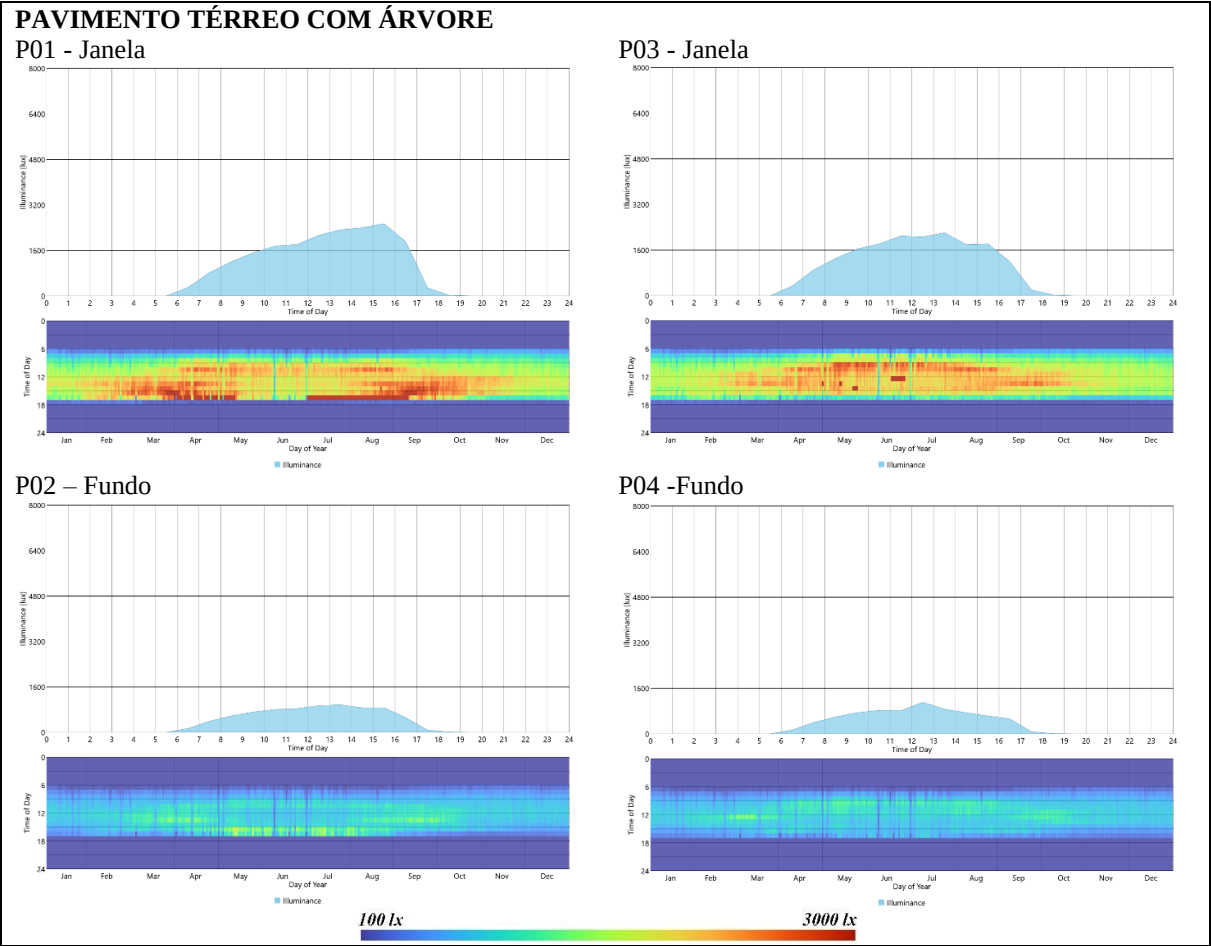
VCP – Visual Comfort Proba

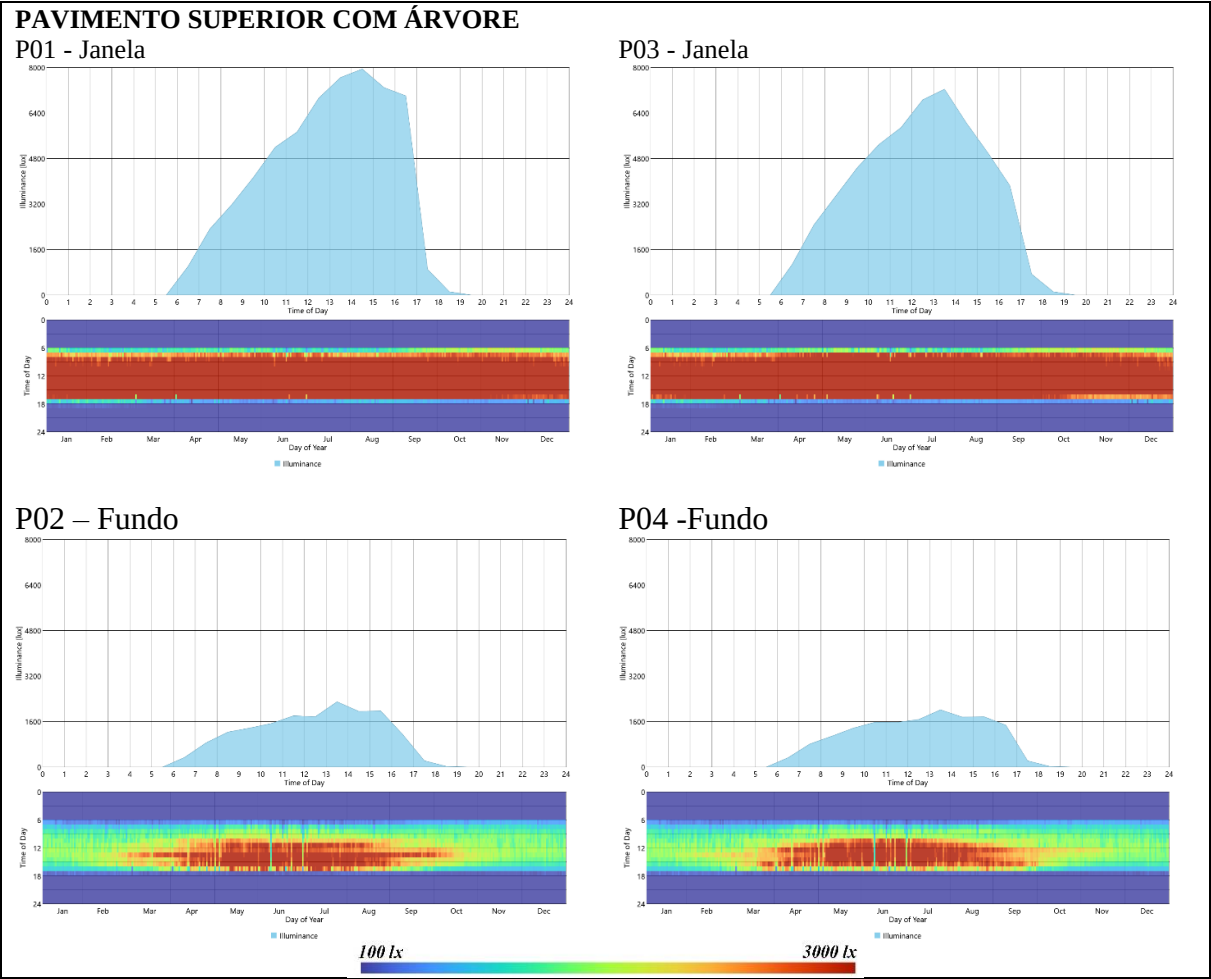
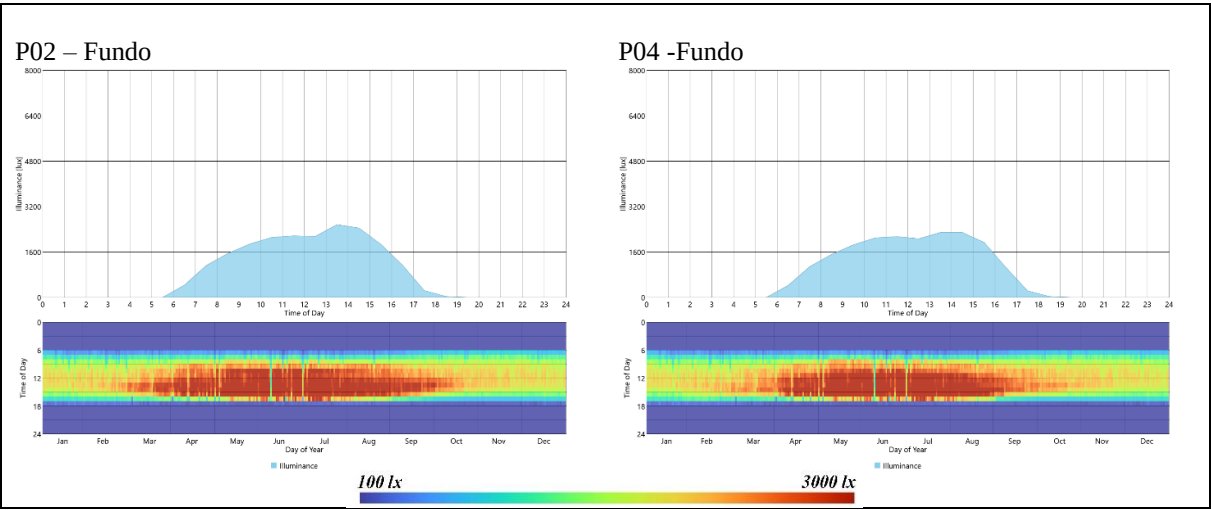
CGI – CIE Glare Index

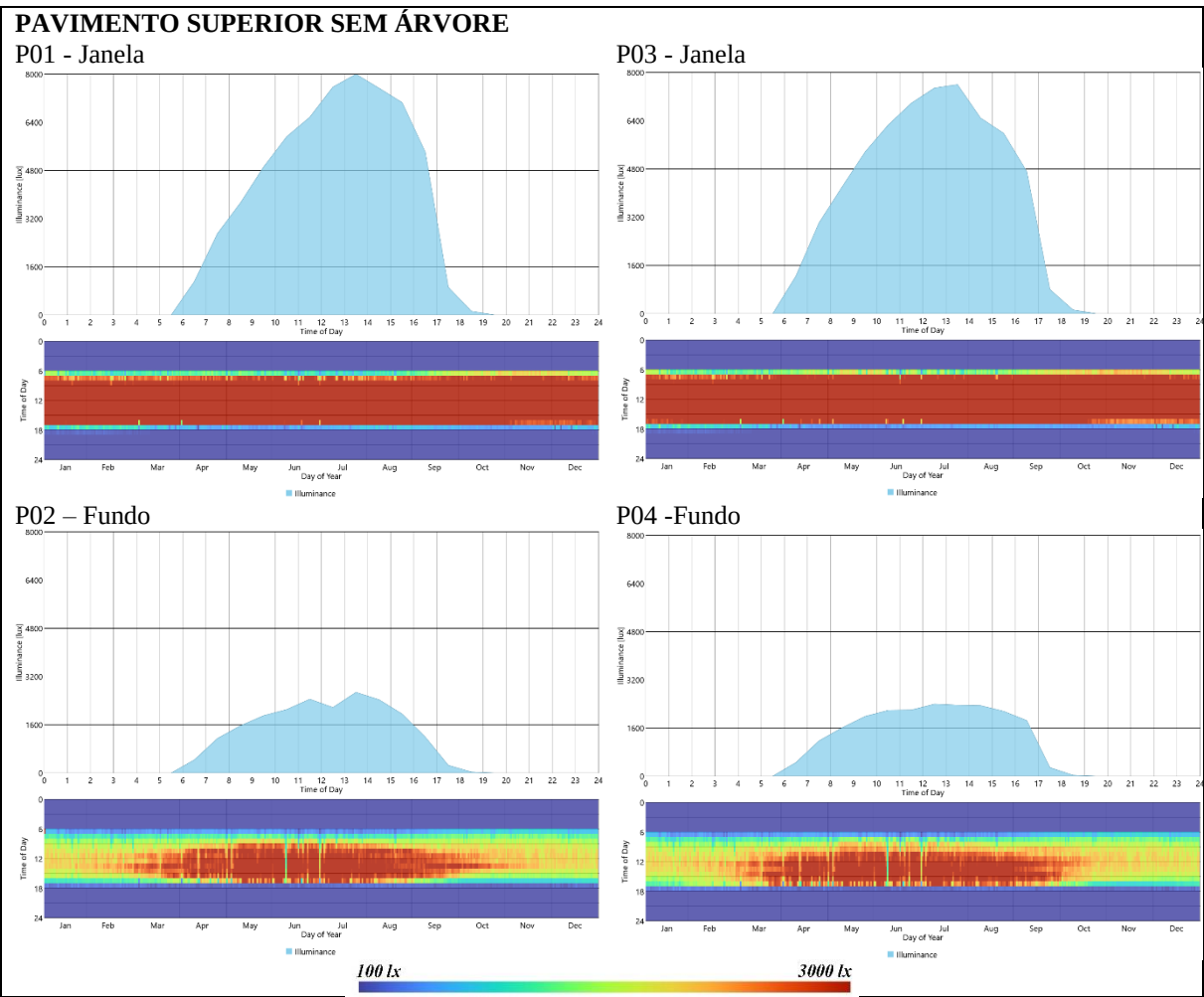
APÊNDICE C

Comportamento da iluminância – simulações computacionais
(Imagens extraídas a partir do ClimateStudio)

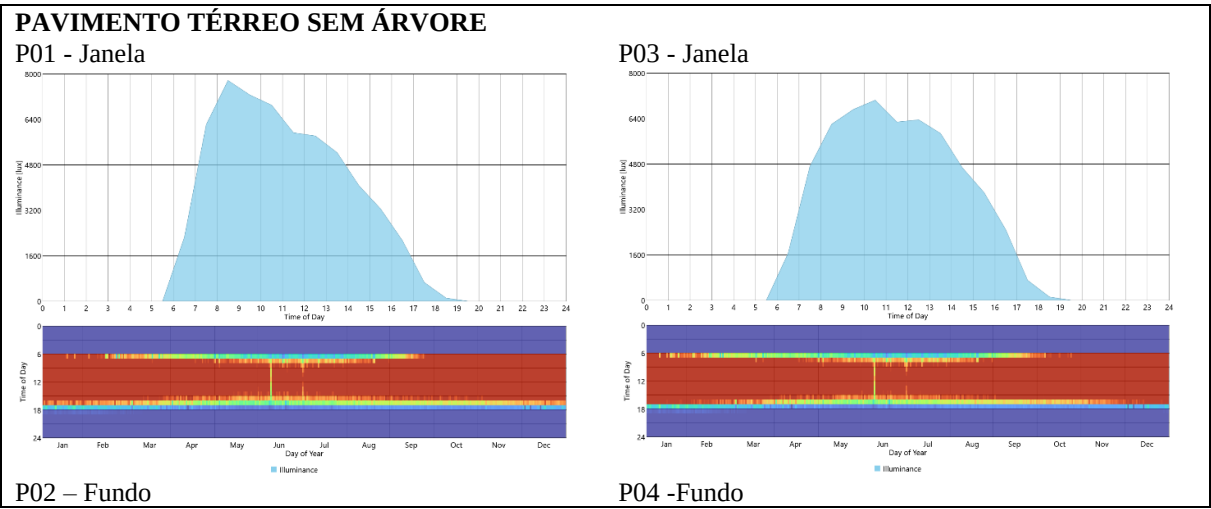
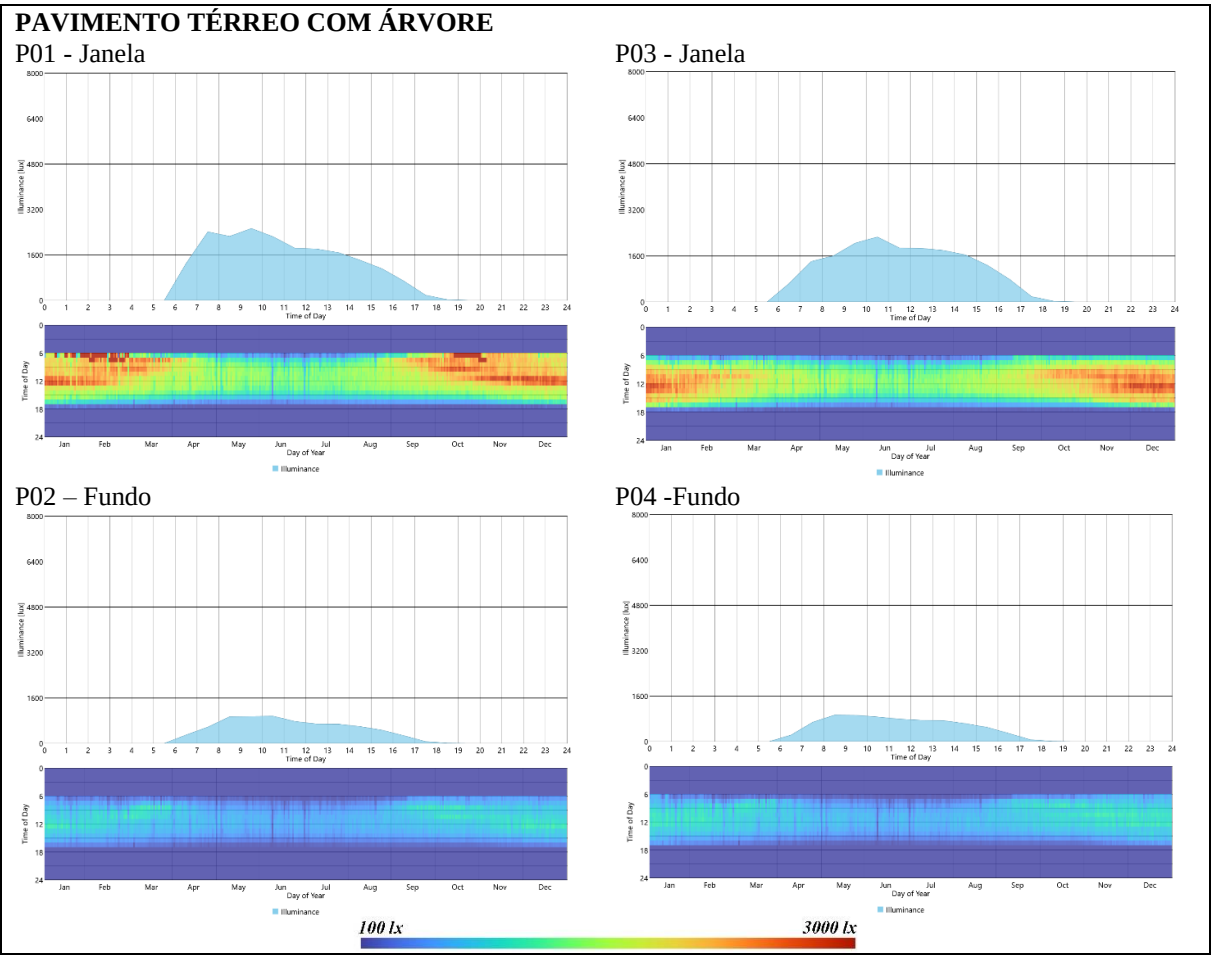
ORIENTAÇÃO NORTE

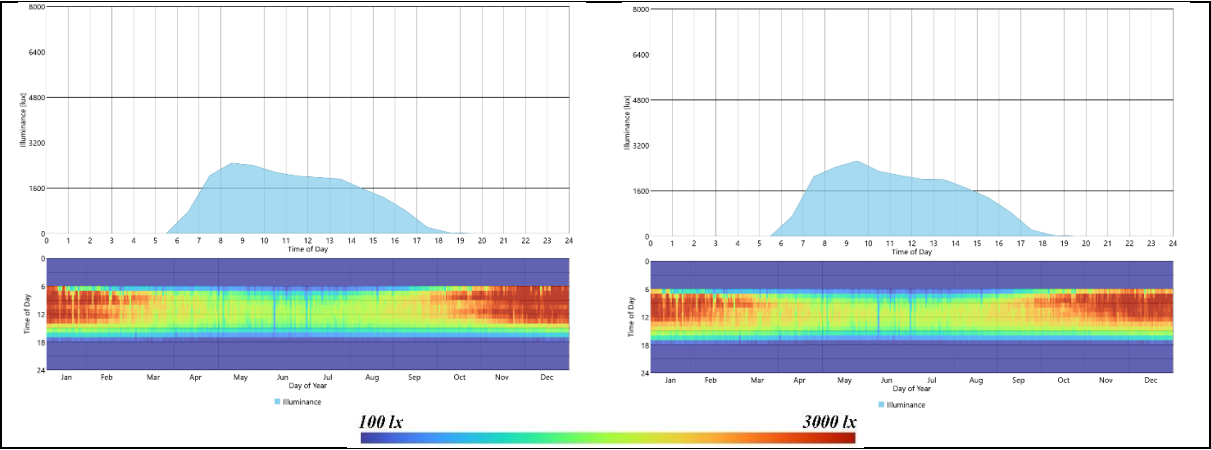






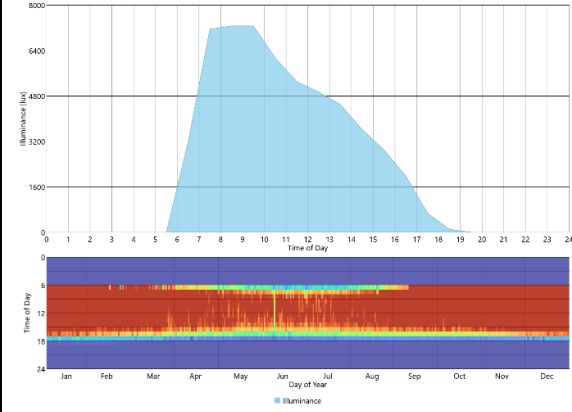
ORIENTAÇÃO SUL



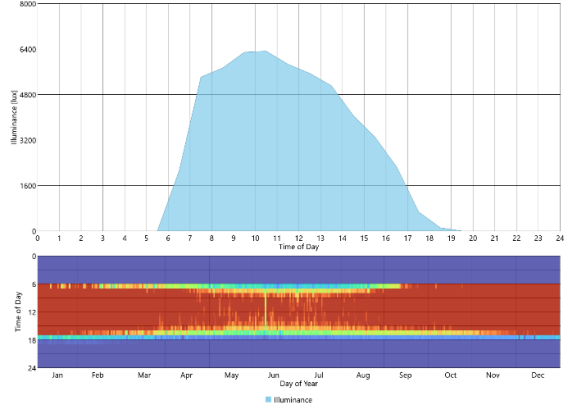


PAVIMENTO SUPERIOR COM ÁRVORE

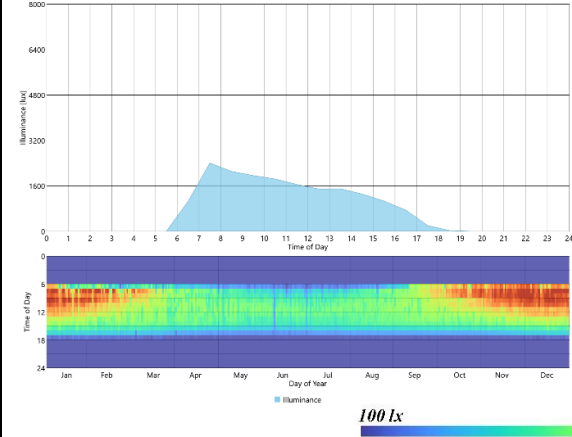
P01 - Janela



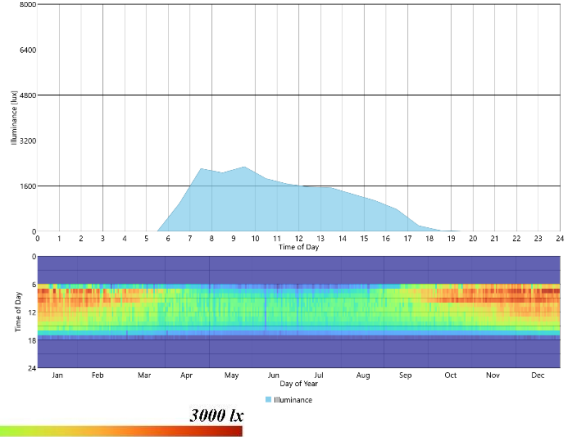
P03 - Janela

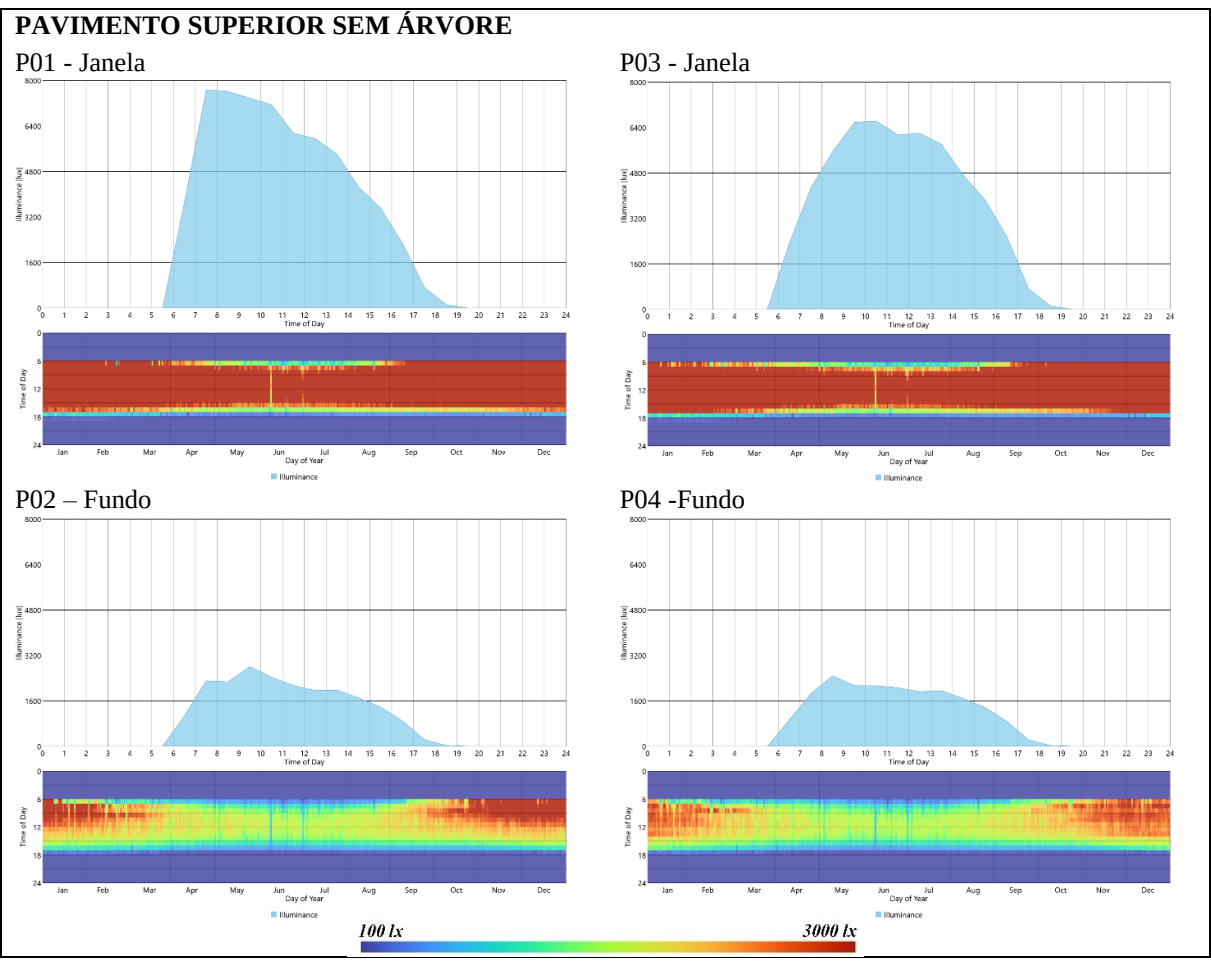


P02 - Fundo

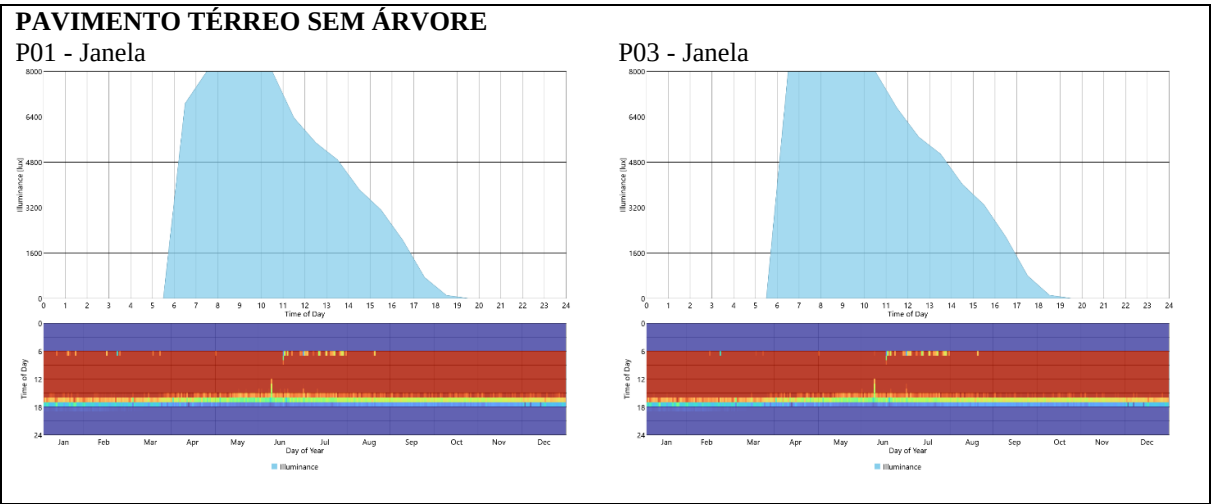
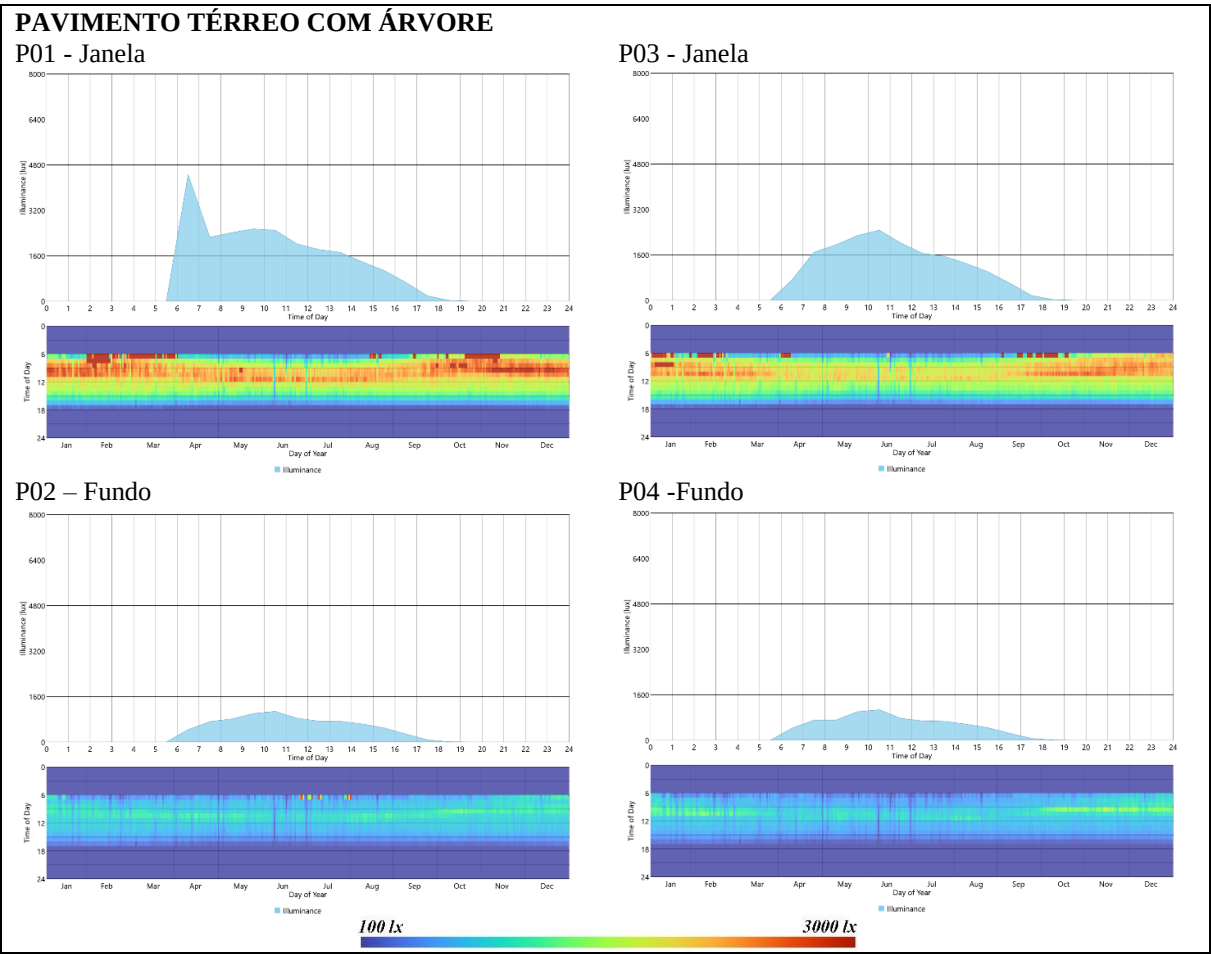


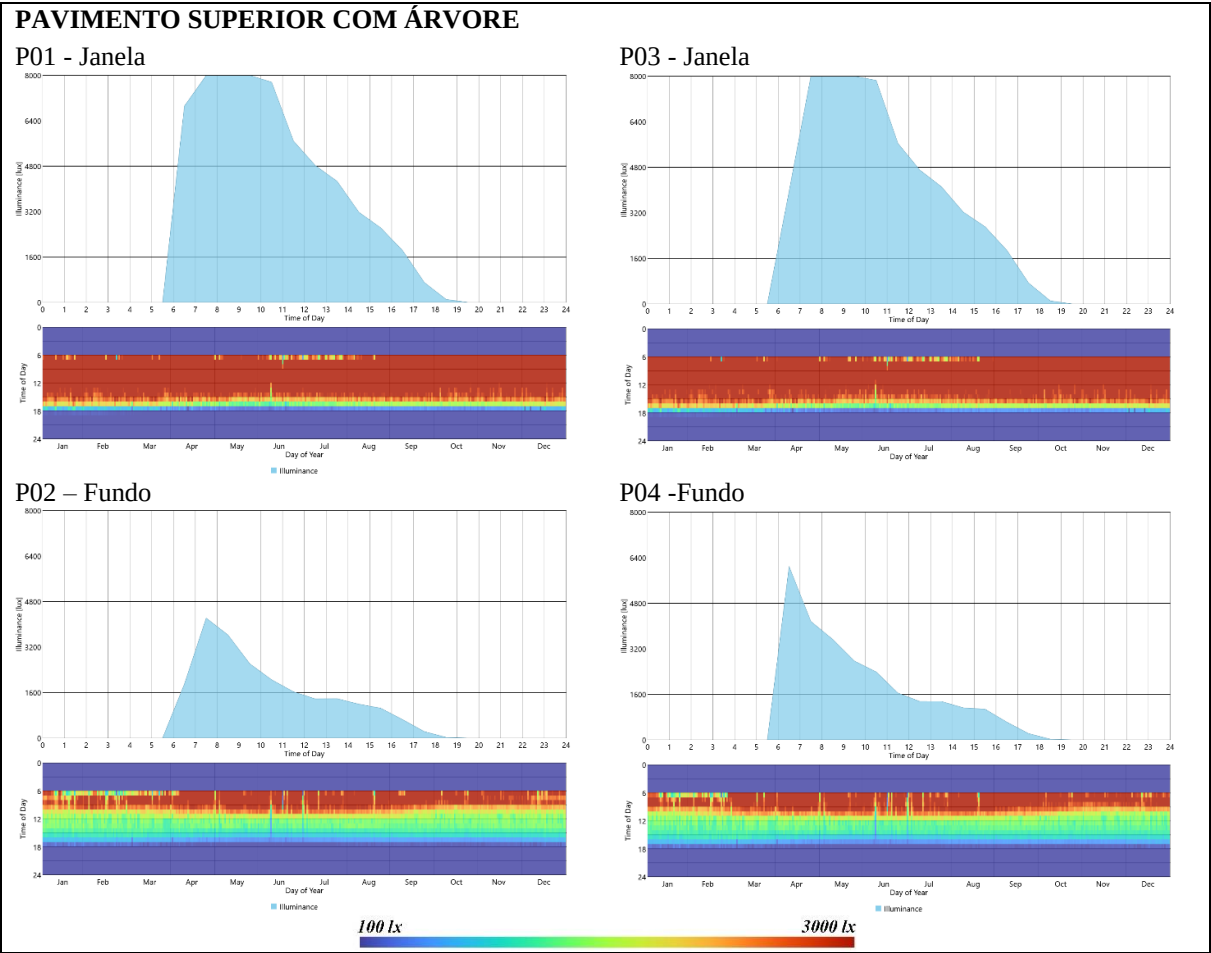
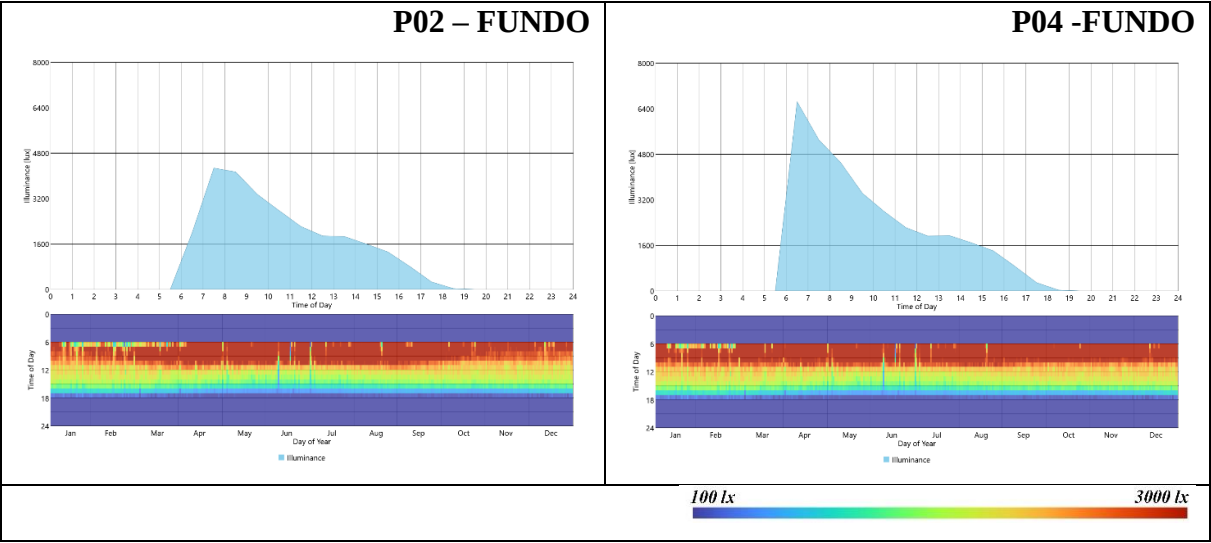
P04 -Fundo

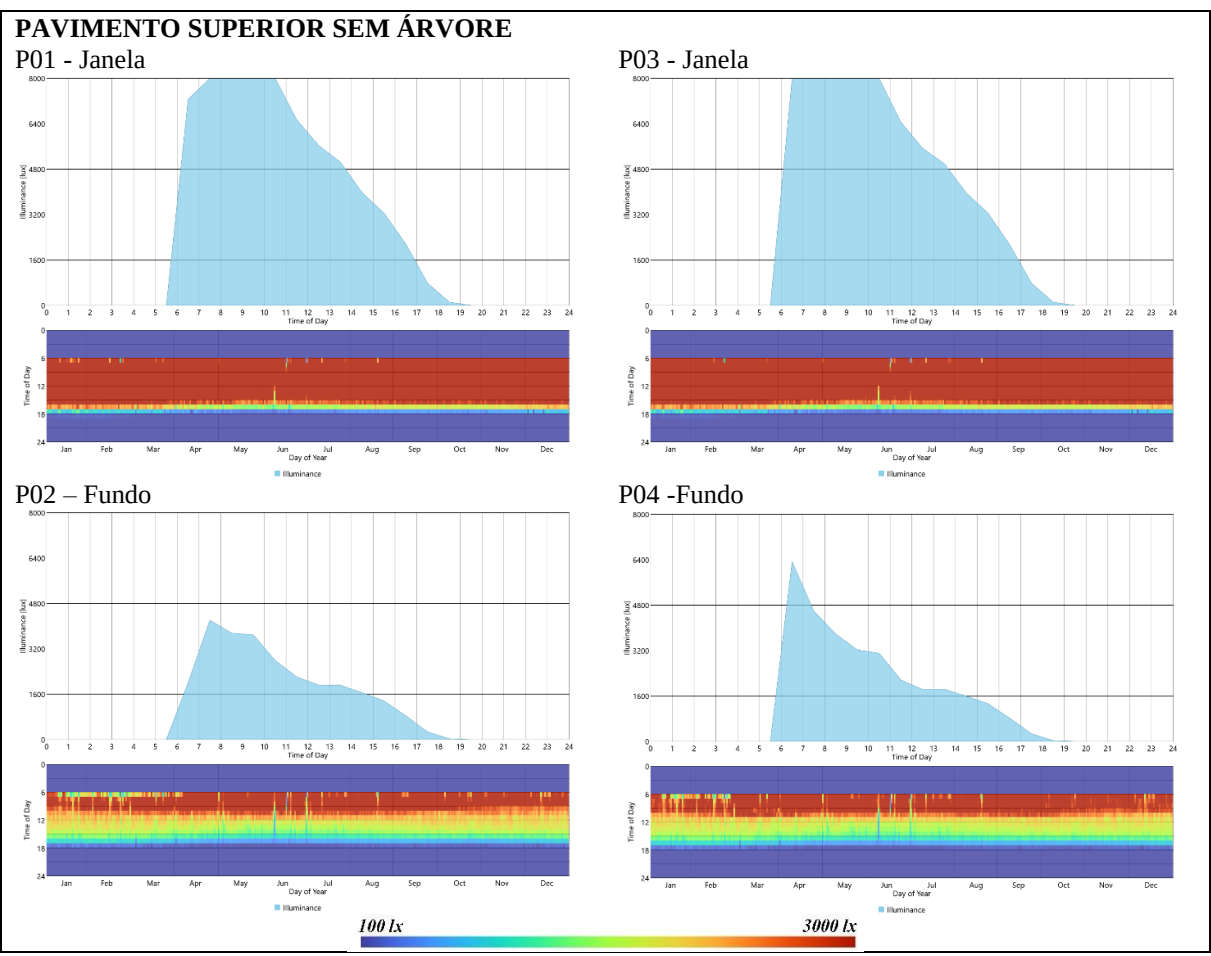




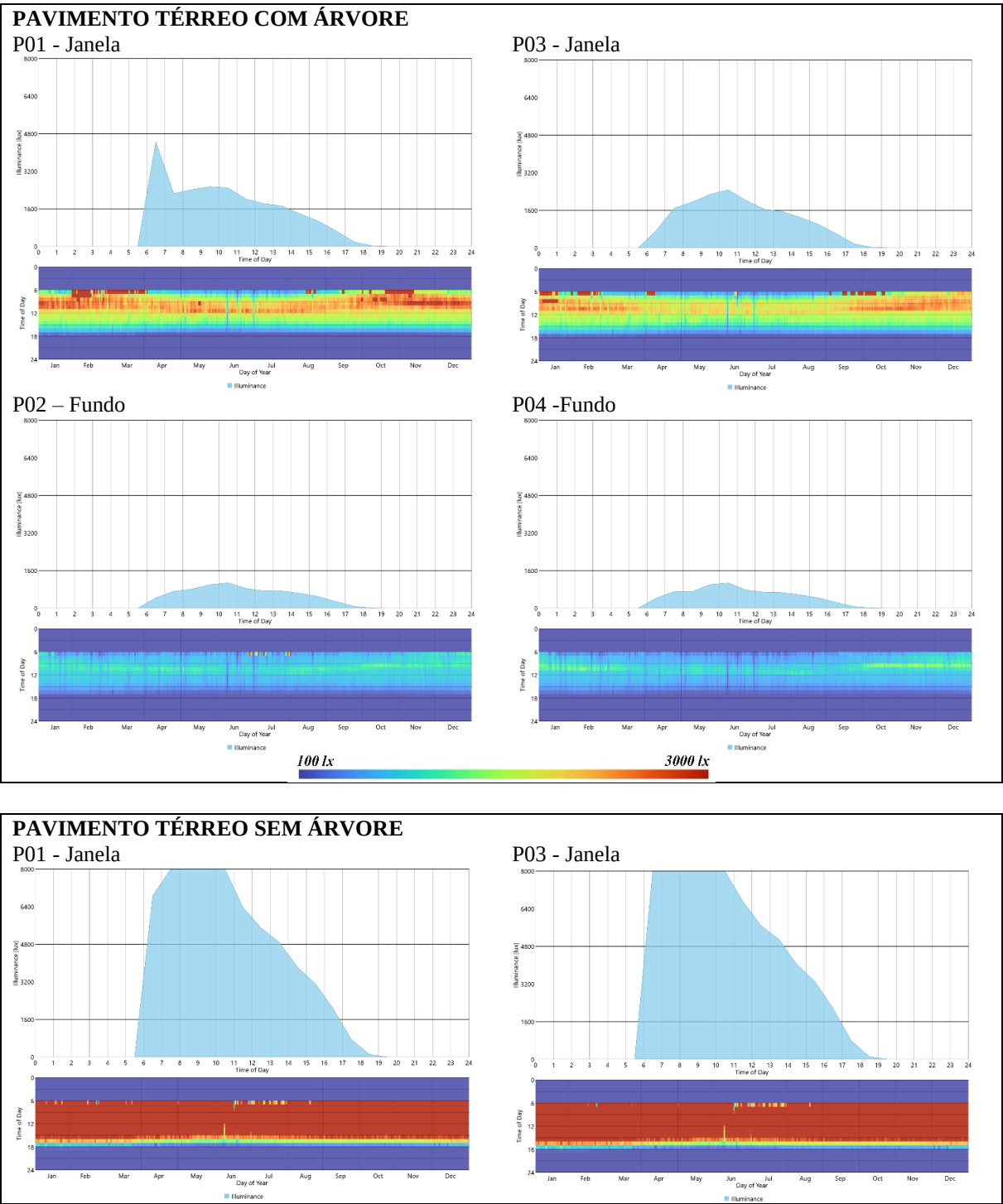
ORIENTAÇÃO LESTE



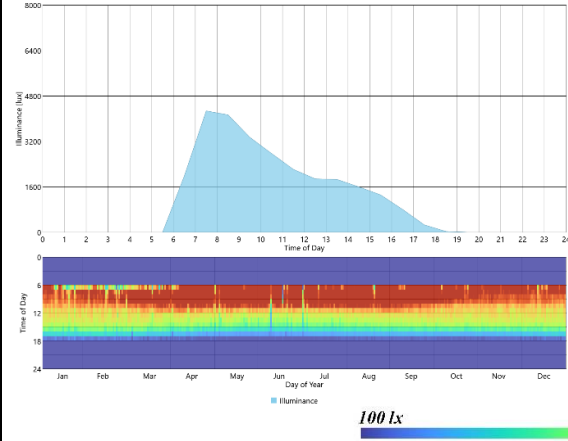




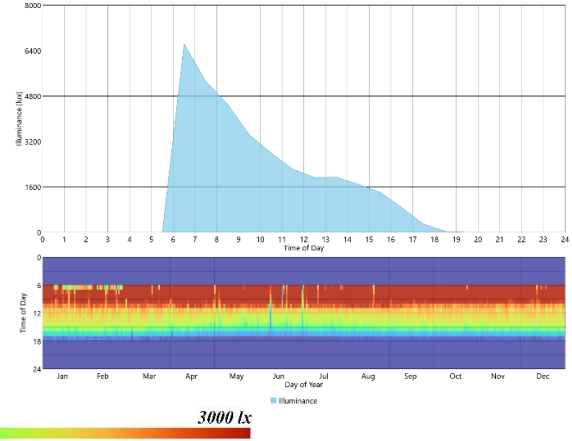
ORIENTAÇÃO OESTE



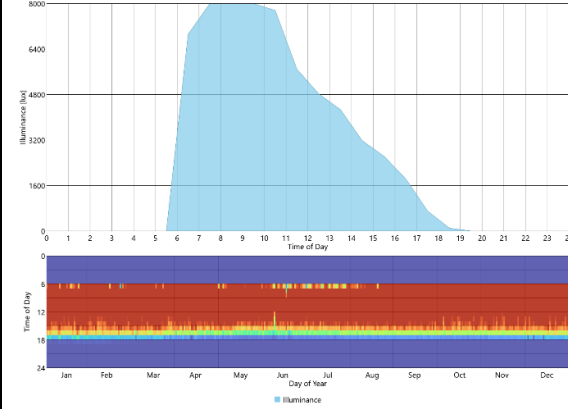
‘P02 – Fundo



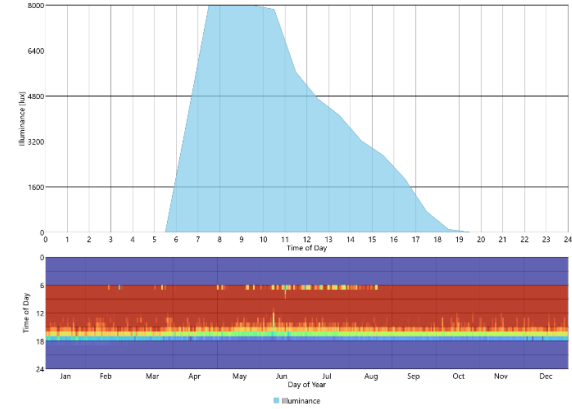
P04 -Fundo



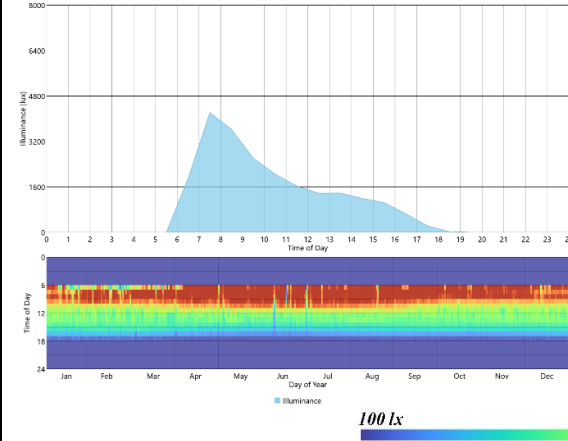
PAVIMENTO SUPERIOR COM ÁRVORE
P01 - Janela



P03 - Janela



P02 – Fundo



P04 -Fundo

