

FACULDADE DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

RICARDO VINICIUS DOTH

**MÉTODO DE AVALIAÇÃO DE ALGORITMOS DE DETECÇÃO E REMOÇÃO DE
SOMBRA EM IMAGENS AÉREAS**

Porto Alegre

2018

PÓS-GRADUAÇÃO - *STRICTO SENSU*



Pontifícia Universidade Católica
do Rio Grande do Sul

Ficha Catalográfica

D725m Doth, Ricardo Vinicius

Método de avaliação de algoritmos de detecção e remoção de sombra em imagens aéreas / Ricardo Vinicius Doth . – 2018.
131 f.

Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, PUCRS.

Orientador: Prof. Dr. Dario Francisco Guimarães de Azevedo.

1. Detecção de Sombras. 2. Remoção de Sombras. 3. Sistema de Imageamento de Areas Amplas. I. Azevedo, Dario Francisco Guimarães de. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da PUCRS
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Bibliotecária responsável: Salete Maria Sartori CRB-10/1363



Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul

ESCOLA POLITÉCNICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - PPGE

MÉTODO DE AVALIAÇÃO DE ALGORITMOS DE DETECÇÃO E REMOÇÃO DE SOMBRA EM IMAGENS AÉREAS

CANDIDATO: RICARDO VINICIUS DOTH

Esta Dissertação de Mestrado foi julgada para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.

DR. DARIO F. GUIMARÃES DE AZEVEDO - ORIENTADOR

BANCA EXAMINADORA

**DR. FABIANO PASSUELO HESSEL - PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA
DA COMPUTAÇÃO - PUCRS**

**DRA. MARIA CRISTINA F. DE CASTRO - PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA - PUCRS**

PUCRS

RICARDO VINICIUS DOTH

**Método de avaliação de algoritmos de detecção
e remoção de sombra em imagens aéreas**

Porto Alegre - RS, Brasil

2018

RICARDO VINICIUS DOTH

**Método de avaliação de algoritmos de detecção e
remoção de sombra em imagens aéreas**

Dissertação apresentada como requisito para a obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. Área de Concentração: Sinais, Sistemas e Tecnologia da Informação.
Linha de Pesquisa: Engenharia Biomédica.

Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul
Escola Politécnica
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. Dario F. Guimarães de Azevedo

Porto Alegre - RS, Brasil

2018

Para minha mãe, minha filha e a toda minha família, que não mediram esforços para que chegasse até esta etapa de minha vida.

Agradecimentos

Primeiramente gostaria de agradecer meu orientador Professor Dario Francisco Guimarães de Azevedo Ph.D., por acreditar em mim e ser um exemplo de caráter e determinação.

Obrigado a United States Air Force Office of Scientific Research e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior por financiar este projeto e meus estudos respectivamente.

Agradeço a todos do projeto NINJA em especial ao Professor Guilherme Fróes Silva e o Leandro Brigoni e Silva, sem o apoio deles este trabalho não seria completo.

À Barbara, que espero um dia compreenda meu esforço.

À Soeli que sempre me apoiou.

Ao povo do LABIMA que brincou muito com a maquete.

"May it be a light to you in dark places, when all other lights go out."
(J.R.R. Tolkien)

Resumo

Sistemas WAMI (*Wide Area Motion Imagery*) adquirem imagens aéreas de grandes áreas em tempo real para prover informações precisas de uma determinada região (BLASCH et al., 2014). Este sistema é aplicado para monitoramento aéreo urbano. Condições ambientais desfavoráveis, como áreas sombreadas, são fatores que aumentam a complexidade do sistema comprometendo a eficácia de algoritmos de rastreamento e a interpretação visual humana (PORTER; FRASER; HUSH, 2010). Diversas técnicas de remoção de sombra em imagens aéreas foram desenvolvidas, no entanto devido às características da sombra e da imagem aérea é desconhecido um método específico para avaliar e comparar a remoção de sombras em imagens aéreas. O objetivo principal deste estudo é desenvolver um método para avaliar algoritmos de remoção de sombra em imagens aéreas adquiridas pelo sistema WAMI. Este trabalho propõe uma abordagem radiométrica modificando a iluminação em um ambiente controlado, simulando uma cena aérea, adquirindo imagens com e sem sombras. A imagem com sombra é processada pelo algoritmo de remoção de sombra avaliado, sendo a imagem sem sombra o resultado ideal a ser alcançado. A detecção de sombra é avaliada utilizando o conceito de matriz de confusão (*error matrix*). A remoção de sombra é avaliada utilizando o índice de similaridade estrutural entre duas imagens (SSIM). Foram desenvolvidos o modelo de cena aérea em escala reduzida para gerar imagens com e sem sombra e a avaliação de 3 métodos de remoção de sombras utilizando os *data sets* de imagens obtidas do modelo em escala aplicando a metodologia descrita.

Palavras-chaves: Detecção de Sombras. Remoção de Sombras. Sistema de Imageamento de Areas Amplas.

Abstract

Wide Area Motion Imagery (WAMI) systems acquire large area aerial images in real time to provide accurate situational awareness information from a region (BLASCH et al., 2014). This system is applied for urban aerial monitoring. Unfavorable environmental conditions, such as shadow regions, are factors that increase system complexity by compromising the effectiveness of tracking algorithms and human visual interpretation (PORTER; FRASER; HUSH, 2010). Several techniques of shadow removal in aerial images have been developed, however due to the characteristics of the shadow and aerial image, a specific method to evaluate and compare the removal is unknown. The main objective of this study is to develop a method to evaluate shadow removal algorithms in aerial images acquired by the WAMI system. This work proposes a radiometric approach modifying the illumination in a controlled environment, simulating an aerial scene, acquiring images with and without the presence of shadows. The image with shadows is processed by the evaluated shadow removal algorithm, with the ideal output being the shadow free image. Shadow detection is evaluated using the confusion matrix concept. Shadow removal is evaluated using the structural similarity index (SSIM). As a result the reduced scale aerial scene model is presented to generate shadow and freeshadow images and the evaluation of 3 shadow removal methods using the *data sets* of images obtained from the scale model applying the methodology developed.

Palavras-chaves: Shadow removal. Shadow detection. Wide Area Motion Imagery.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Representação esquemática do tamanho de pixel no chão (GSD).	21
Figura 2 – Desenho esquemático do sistema WAMI exemplificando a altura e rota de voo em função da imagem a ser adquirida.	22
Figura 3 – Características da sombra, localização da self-shadow e cast-shadow com umbra e penumbra.	23
Figura 4 – Padrão espectral para simuladores solares, utilizados para avaliação de células fotovoltaicas	25
Figura 5 – Espectro de radiação eletromagnético	25
Figura 6 – Resposta fotométrica do sistema visual humano com <i>S-cones</i> com pico de absorção em 445nm <i>M-cones</i> com pico de absorção em 535nm <i>L-cones</i> com pico de absorção em 575nm (NAVE, 2012).	26
Figura 7 – (Modo de agrupamento dos modelos em escala) (O autor, 2017).	30
Figura 8 – Modelo em escala de 1:200 (a) simulação em CAD (b) modelo físico.	31
Figura 9 – Radiações que atuam no sensor da câmera de um sistema WAMI. Radiação direta (R_{direct}) é a reflexão da luz solar. Radiação atmosférica ($R_{Atmospheric}$) é o espalhamento da luz na atmosfera, explicado como efeito Rayleigh, e a radiação do ambiente ($R_{Environment}$) que envolve o entorno.	31
Figura 10 – Conceito de cena com sombra, utilizando luz direta e difusa em baixo comprimento de onda.	32
Figura 11 – Conceito de cena para criar a imagem considerada ideal sem sombra, utilizando apenas luz difusa.	33
Figura 12 – Metodologia aplicada à detecção de sombras, comparação entre máscaras.	35
Figura 13 – Esquemático de avaliação de detecção de sombras. Subtraindo (1) a imagem ideal (a) da imagem com sombra removida pelo método avaliado (d), obtendo a máscara de modificações (e). Agrupa-se em (2) a máscara de sombras original (c) com a máscara de modificações (e), obtendo a sobreposição das máscaras (f). A sobreposição de máscara apresenta, em região em branco, regiões sem sombras que foram classificadas corretamente como regiões sem sombras, pelo método avaliado. Regiões em preto mostram regiões classificadas corretamente como sombra. Regiões em magenta correspondem erroneamente a regiões classificadas como sombra (falso positivo). Regiões em verde representam regiões de sombra não detectadas pelo algoritmo avaliado (falso negativo).	37

Figura 14 – Metodologia aplicada avaliação de re-iluminação da imagem com sombra, separando regiões de sombra de regiões iluminadas utilizando a máscara de sombras original	38
Figura 15 – Metodologia aplicada a avaliação de re-iluminação de regiões de sombra.	39
Figura 16 – Metodologia aplicada a avaliação de re-iluminação de regiões iluminadas.	40
Figura 17 – Modelo em escala, projetado em CAD	41
Figura 18 – Simulação de iluminação no modelo em CAD.	42
Figura 19 – Imagem adquirida do modelo em escala com específico GSD.	42
Figura 20 – Simulação de iluminação no modelo físico.	43
Figura 21 – Processo de geração de máscara de sombra.	44
Figura 22 – <i>Data set 1</i> : Imagens adquiridas em ambiente interno com fonte de iluminação artificial.	46
Figura 23 – <i>Data set 1</i> : Avaliação de detecção do método de Otsu.	47
Figura 24 – <i>Data set 1</i> : Avaliação de detecção do método de K-means.	48
Figura 25 – <i>Data set 1</i> : Avaliação de detecção do método de Gong.	49
Figura 26 – <i>Data set 1</i> : Referência para a avaliação de re-iluminação da região de sombras.	51
Figura 27 – <i>Data set 1</i> : Avaliação de re-iluminação da região de sombras do método de Otsu.	52
Figura 28 – <i>Data set 1</i> : Avaliação de re-iluminação da região de sombras do método de K-means.	53
Figura 29 – <i>Data set 1</i> : Avaliação de re-iluminação da região de sombras do método de Gong.	54
Figura 30 – <i>Data set 1</i> : Avaliação da re-iluminação da região iluminada processada pelo método de Otsu.	56
Figura 31 – <i>Data set 1</i> : Avaliação da re-iluminação da região iluminada processada pelo método de K-means	57
Figura 32 – <i>Data set 1</i> : Avaliação da re-iluminação da região iluminada processada pelo método de Gong.	58
Figura 33 – <i>Data set 2</i> : Imagens adquiridas em ambiente interno com fonte de iluminação artificial.	60
Figura 34 – <i>Data set 2</i> : Avaliação de detecção do método de Otsu.	62
Figura 35 – <i>Data set 2</i> : Avaliação de detecção do método de K-means.	63
Figura 36 – <i>Data set 2</i> : Avaliação de detecção do método de Gong.	64
Figura 37 – <i>Data set 2</i> : Referência para a avaliação de re-iluminação da região de sombras.	66
Figura 38 – <i>Data set 2</i> : Avaliação de re-iluminação da região de sombras do método de Otsu.	67

Figura 39 – <i>Data set 2</i> : Avaliação de re-iluminação da região de sombras do método de K-means.	68
Figura 40 – <i>Data set 2</i> : Avaliação de re-iluminação da região de sombras do método de Gong.	69
Figura 41 – <i>Data set 2</i> : Avaliação da re-iluminação da região iluminada processada pelo método de Otsu.	71
Figura 42 – <i>Data set 2</i> : Avaliação da re-iluminação da região iluminada processada pelo método de K-means	72
Figura 43 – <i>Data set 2</i> : Avaliação da re-iluminação da região iluminada processada pelo método de Gong.	73
Figura 44 – <i>Data set 3</i> : Imagens adquiridas em ambiente Externo com fonte de iluminação natural.	75
Figura 45 – <i>Data set 3</i> : Avaliação de detecção do método de Otsu.	77
Figura 46 – <i>Data set 3</i> : Avaliação de detecção do método de K-means.	78
Figura 47 – <i>Data set 3</i> : Avaliação de detecção do método de Gong.	79
Figura 48 – <i>Data set 3</i> : Referência para a avaliação de re-iluminação da região de sombras.	81
Figura 49 – <i>Data set 3</i> : Avaliação de re-iluminação da região de sombras do método de Otsu.	82
Figura 50 – <i>Data set 3</i> : Avaliação de re-iluminação da região de sombras do método de K-means.	83
Figura 51 – <i>Data set 3</i> : Avaliação de re-iluminação da região de sombras do método de Gong.	84
Figura 52 – <i>Data set 3</i> : Avaliação da re-iluminação da região iluminada processada pelo método de Otsu.	86
Figura 53 – <i>Data set 3</i> : Avaliação da re-iluminação da região iluminada processada pelo método de K-means	87
Figura 54 – <i>Data set 3</i> : Avaliação da re-iluminação da região iluminada processada pelo método de Gong.	88
Figura 55 – <i>Data set 4</i> : Imagens adquiridas em ambiente externo com fonte de iluminação natural.	90
Figura 56 – <i>Data set 4</i> : Avaliação de detecção do método de Otsu.	92
Figura 57 – <i>Data set 4</i> : Avaliação de detecção do método de K-means.	93
Figura 58 – <i>Data set 4</i> : Avaliação de detecção do método de Gong.	94
Figura 59 – <i>Data set 4</i> : Modificação da máscara de sombras devido a árvore na sombra não existir na imagem ideal.	95
Figura 60 – <i>Data set 4</i> : Referência para a avaliação de re-iluminação da região de sombras.	96

Figura 61 – <i>Data set 4</i> : Avaliação de re-iluminação da região de sombras do método de Otsu.	97
Figura 62 – <i>Data set 4</i> : Avaliação de re-iluminação da região de sombras do método de K-means.	98
Figura 63 – <i>Data set 4</i> : Avaliação de re-iluminação da região de sombras do método de Gong.	99
Figura 64 – <i>Data set 4</i> : Avaliação da re-iluminação da região iluminada processada pelo método de Otsu.	101
Figura 65 – <i>Data set 4</i> : Avaliação da re-iluminação da região iluminada processada pelo método de K-means	102
Figura 66 – <i>Data set 4</i> : Avaliação da re-iluminação da região iluminada processada pelo método de Gong.	103
Figura 67 – <i>Data set 5</i> : Imagens adquiridas em ambiente externo com fonte de iluminação natural.	105
Figura 68 – <i>Data set 5</i> : Avaliação de detecção do método de Otsu.	107
Figura 69 – <i>Data set 5</i> : Avaliação de detecção do método de K-means.	108
Figura 70 – <i>Data set 5</i> : Avaliação de detecção do método de Gong.	109
Figura 71 – <i>Data set 5</i> : Referência para a avaliação de re-iluminação da região de sombras.	111
Figura 72 – <i>Data set 5</i> : Avaliação de re-iluminação da região de sombras do método de Otsu.	112
Figura 73 – <i>Data set 5</i> : Avaliação de re-iluminação da região de sombras do método de K-means.	113
Figura 74 – <i>Data set 5</i> : Avaliação de re-iluminação da região de sombras do método de Gong.	114
Figura 75 – <i>Data set 5</i> : Avaliação da re-iluminação da região iluminada processada pelo método de Otsu.	116
Figura 76 – <i>Data set 5</i> : Avaliação da re-iluminação da região iluminada processada pelo método de K-means	117
Figura 77 – <i>Data set 5</i> : Avaliação da re-iluminação da região iluminada processada pelo método de Gong.	118

Lista de tabelas

Tabela 1	– Distância entre pixel no CCD da câmera WAMI e na Nikon D3400 . . .	29
Tabela 2	– A relação entre a escala do modelo, a distância da câmera (R) e a área imageada (FOV) em função do tamanho de pixel no chão (GSD). . .	30
Tabela 3	– <i>Data set 1</i> : Tabela de avaliação de detecção de sombra.	46
Tabela 4	– <i>Data set 1</i> : Índice de similaridade entre as regiões de sombra	50
Tabela 5	– <i>Data set 1</i> : Avaliação da re-iluminação da região iluminada da imagem pelo método de similaridade estrutural	55
Tabela 6	– <i>Data set 2</i> : Tabela de avaliação de detecção de sombra.	61
Tabela 7	– <i>Data set 2</i> : Índice de similaridade entre as regiões de sombra	65
Tabela 8	– <i>Data set 2</i> : Avaliação da re-iluminação da região iluminada da imagem pelo método de similaridade estrutural	70
Tabela 9	– <i>Data set 3</i> : Tabela de avaliação de detecção de sombra.	76
Tabela 10	– <i>Data set 3</i> : Índice de similaridade entre as regiões de sombra	80
Tabela 11	– <i>Data set 3</i> : Avaliação da re-iluminação da região iluminada da imagem pelo método de similaridade estrutural	85
Tabela 12	– <i>Data set 4</i> : Tabela de avaliação de detecção de sombra.	91
Tabela 13	– <i>Data set 4</i> : Índice de similaridade entre as regiões de sombra	95
Tabela 14	– <i>Data set 4</i> : Avaliação da re-iluminação da região iluminada da imagem pelo método de similaridade estrutural	100
Tabela 15	– <i>Data set 5</i> : Tabela de avaliação de detecção de sombra.	106
Tabela 16	– <i>Data set 5</i> : Índice de similaridade entre as regiões de sombra	110
Tabela 17	– <i>Data set 5</i> : Avaliação da re-iluminação da região iluminada da imagem pelo método de similaridade estrutural	115

Lista de abreviaturas e siglas

WAMI	do inglês <i>Wide Area Motion Imagery</i> , que significa Monitoramento aéreo de grandes áreas.
GSD	do inglês <i>Ground Sample Distance</i> que significa o tamanho do pixel no chão.
MSE	do inglês <i>Mean Square Error</i> que significa o erro médio quadrático entre duas imagens.
SNR	do inglês <i>signal-to-noise ratio</i> que significa razão sinal ruído.
PSNR	do inglês <i>Peak signal-to-noise ratio</i> que significa razão sinal ruído de pico.
SSIM	do inglês <i>Structural Similarity index</i> que significa índice de similaridade estrutural.

Lista de símbolos

p	do inglês <i>pitch</i> , distância entre pixel do ccd de uma câmera.
f	distância focal.
R	distância entre o solo e o ponto focal.
Sw	largura do sensor CCD.
imW	numero de coluna da matriz de pixel que compõe um ccd.
H	altura de voo.
μ	média.
σ	desvio padrão.
$\sigma_{I,R}$	representa a covariância entre as imagens.
TP	significa acerto na parte positiva da imagem.
TN	significa acerto na parte negativa da imagem.
FP	significa erro na parte positiva da imagem.
FN	significa erro na parte negativa da imagem.
η_s	quanto de toda região de sombra da máscara de sombra original foi detectada pelo método avaliado.
η_n	quanto de toda região iluminada da máscara de sombra original foi detectada pelo método avaliado.
ps	o quanto que a máscara de sombra do método avaliado acertou a sombra da máscara de sombra original.
pn	o quanto que a máscara de sombra do método avaliado acertou a área iluminada da máscara de sombra original.
τ	conta todos os acertos de regiões de sombra e iluminação em relação a toda imagem.
I	irradiação.
I_0	irradiação incidente.

- ϵ é a permissividade dielétrica da partícula em relação ao meio.
- θ é o angulo de espalhamento.
- n é o numero de partículas espalhadas.
- V é o volume da partícula.
- λ é o comprimento de onda de luz incidente.
- r é a distância entre as partículas espalhadas e o observador.

Sumário

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	ESTADO DA ARTE	17
1.2	OBJETIVO GERAL	19
1.3	ESTRUTURA	19
2	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	20
2.1	FOTOGRAFIA AÉREA	20
2.1.1	Fotogrametria aérea	20
2.1.2	Ground sample distance (GSD)	21
2.2	WAMI	22
2.3	CARACTERÍSTICAS DA SOMBRA	22
2.3.1	Efeito Rayleigh	23
2.4	SIMULADOR SOLAR	24
2.5	ÍNDICE DE REPRODUÇÃO DE COR	24
2.6	RADIOMETRIA	25
2.7	SISTEMA VISUAL HUMANO	26
2.8	MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE QUALIDADE DE IMAGEM	26
2.8.1	Método de Similaridade Estrutural (SSIM)	27
3	METODOLOGIA	29
3.1	Modelo em Escala	29
3.1.1	Escala da maquete	30
3.2	SISTEMA DE ILUMINAÇÃO	30
3.3	DATA SETS DE IMAGENS	32
3.4	ALGORITMOS AVALIADOS	33
3.4.1	Método Otsu	33
3.4.2	Método K-means	34
3.4.3	Método Gong	34
3.5	MÉTODO DE AVALIAÇÃO DE ALGORÍTIMOS DE DETECÇÃO DE SOMBRA	34
3.6	MÉTODO DE AVALIAÇÃO DE ALGORÍTIMOS DE REMOÇÃO DE SOMBRA	38
3.6.1	Avaliação da re-iluminação em áreas sem sombras da imagem	40
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
4.1	CENA AÉREA	41

4.2	ILUMINAÇÃO	43
4.3	MÁSCARA DE SOMBRAS	43
4.4	AVALIAÇÃO DE MÉTODOS DE REMOÇÃO DE SOMBRA	45
4.4.1	<i>Data set 1</i>	45
4.4.1.1	Avaliação de detecção de Sombra	45
4.4.1.2	Avaliação de re-iluminação de áreas sombreadas	50
4.4.1.2.1	Avaliação de re-iluminação de áreas iluminada	55
4.4.1.3	<i>Data set 1: Discussão</i>	59
4.4.2	<i>Data set 2</i>	60
4.4.2.1	Avaliação de detecção de Sombra	61
4.4.2.2	Avaliação de re-iluminação de áreas sombreadas	65
4.4.2.2.1	Avaliação de re-iluminação de áreas iluminadas	70
4.4.2.3	<i>Data set 2: Discussão</i>	74
4.4.3	<i>Data set 3</i>	75
4.4.3.1	Avaliação de detecção de Sombra	76
4.4.3.2	Avaliação de re-iluminação de áreas sombreadas	80
4.4.3.3	Avaliação de re-iluminação de áreas iluminada	85
4.4.3.4	<i>Data set 3: Discussão</i>	89
4.4.4	<i>Data set 4</i>	90
4.4.4.1	Avaliação de detecção de Sombra	91
4.4.4.2	Avaliação de re-iluminação de áreas sombreadas	95
4.4.4.2.1	Avaliação de re-iluminação de áreas iluminada	100
4.4.4.3	<i>Data set 4: Discussão</i>	104
4.4.5	<i>Data set 5</i>	105
4.4.5.1	Avaliação de detecção de Sombra	106
4.4.5.2	Avaliação de re-iluminação de áreas sombreadas	110
4.4.5.2.1	Avaliação de re-iluminação de áreas iluminada	115
4.4.5.3	<i>Data set 5: Discussão</i>	119
5	CONCLUSÃO	120
5.1	TRABALHOS FUTUROS	122
	REFERÊNCIAS	123

1 INTRODUÇÃO

Sistemas WAMI (*Wide Area Motion Imagery*) adquirem imagens aéreas de grandes áreas em tempo real para prover informações precisas de uma determinada região (BLASCH et al., 2014). Este sistema é aplicado para monitoramento aéreo urbano, onde pode ser utilizado para definir rotas em tempo real para sistemas de emergências, como polícias, bombeiros e ambulâncias. Na área de segurança é utilizado para informar movimento de pessoas e veículos, possibilitando rastrear movimentos suspeitos antes e depois de alguma transgressão. Vale ressaltar que sistemas WAMI monitoram uma ampla área e adquirem imagens de forma a criar um perímetro de monitoramento constante, ou seja quando for necessário focar em um evento específico em determinada região monitorada, será feito um magnificação digital para o operador do sistema e o comprimento focal da lente da câmera não é modificado.

O sistema WAMI opera de forma a capturar a maior área imageada possível em função da altura de voo e da resolução que pode fazer com que objetos alvos como pessoas ou veículos fiquem representados por poucos pixel. Aplicações em sensoriamento remoto consideram como alta resolução o tamanho de pixel no chão menor do que um metro quadrado, caracterizando o sistema WAMI como um sistema de alta resolução (MUMBY; EDWARDS, 2002). A baixa resolução temporal (4 quadros por segundo) e condições ambientais desfavoráveis, como áreas sombreadas, são fatores que aumentam a complexidade do sistema, comprometendo a eficácia de algoritmos de rastreamento e a interpretação visual humana (PORTER; FRASER; HUSH, 2010). Além disso, as imagens capturadas em sobrevoo estão sujeitas a mudanças dependendo da posição da fonte de luz e dos movimentos realizados pelo hardware de aquisição.

Em aplicações de sensoriamento remoto, o acompanhamento de objetos em movimento é prejudicado quando estes atingem regiões de sombras, as quais podem modificar a cor e forma dos objetos (PAN et al., 2014), especialmente em baixas resoluções. Diversas técnicas de remoção de sombra foram desenvolvidas, no entanto devido às características da sombra e da imagem aérea, é desconhecido um método específico para avaliar e comparar a remoção. O objetivo principal deste estudo é desenvolver um método para avaliar algoritmos de remoção de sombra em imagens aéreas adquiridas pelo sistema WAMI.

1.1 ESTADO DA ARTE

Algoritmos de remoção de sombra são amplamente utilizados em aplicações desde imagens médicas (KHARE; SRIVASTAVA; JEON, 2017) até de imagens de satélites

(ZIGH; KOUNINEF; KADIRI, 2017). Aplicações para imageamento por satélite diferem de aplicações *WAMI* pela forma de aquisição da imagem. Satélites utilizam câmeras hiper-espectrais enquanto sistemas *WAMI* normalmente utilizam câmeras de espectro de luz visível.

A abordagem mais popular para a detecção de sombras é usar diversas informações variantes e invariantes para definir características da sombra (KHAN et al., 2016). Alguns autores como (ZHU et al., 2010), (LALONDE; EFROS; NARASIMHAN, 2010), (GUO; DAI; HOIEM, 2013) e (SALVADOR; CAVALLARO; EBRAHIMI, 2004) focam em características de cromaticidade e textura da sombra para determinar as condições de iluminação da cena. Outra tendência é avaliar as propriedades de iluminação, assim como (JIANG; WYATT, 2011) e (PANAGOPOULOS et al., 2012). Como as sombras são importantes para construir cenas em 3D, alguns autores detectam e focam nelas para estimar alturas de edifícios como (LIASIS; STAVROU, 2016). Em aplicações de vigilância por vídeo, as técnicas aproveitam as imagens múltiplas (FINLAYSON; FREDEMBACH; DREW, 2007) ou sequências de imagens para detectar sombras (JOSHI; PAPANIKOLOPOULOS, 2008).

Em relação à remoção de sombras, várias técnicas também estão presentes na literatura e muitas vezes estão ligadas ao método de detecção utilizado pelo autor. Normalmente, as vantagens e desvantagens desses métodos estão associadas a muitas cenas de imagens diferentes. Em outras palavras, cada método tem um cenário em que é melhor que os outros. Para imagens aéreas (SILVA et al., 2017) usou o método de limiarização por histograma para criar a máscara de sombras e combinou com um processamento local das regiões de sombra, utilizando-se das bordas não sombreadas destas regiões para re-iluminar as regiões sombreadas como uma evolução dos métodos de Guo, Dai e Hoiem (2013) e Ye, Xie e Xu (2012).

Alguns pesquisadores desenvolveram métodos de avaliação de remoção de sombras para imagens RGB tal como (GUO; DAI; HOIEM, 2013) e (AL-NAJDAWI et al., 2012), porém limitados a fotografias de pessoas à curta distância, em alta resolução e com sombras bem definidas.

Em imagens aéreas (ADELINE et al., 2013) limitou seu trabalho a avaliar a detecção de sombras, comparando o resultado da detecção com uma máscara de sombra da mesma imagem. A máscara de sombra foi gerada manualmente com editor de imagens. A quantificação de remoção de sombra em imagens aéreas até o momento não foi abordada na literatura.

Este trabalho propõe uma abordagem radiométrica modificando a iluminação em um ambiente controlado, simulando uma cena aérea, possibilitando a aquisição de imagens com e sem a presença de sombras. A imagem com sombra será processada pelo algoritmo de remoção de sombra avaliado, sendo a imagem sem sombra como ideal a ser alcançado.

A comparação entre a imagem com a sombra removida e a ideal avaliará a capacidade de detecção das regiões de sombra e o sucesso na respectiva remoção.

O estudo auxiliará o desenvolvimento de algoritmos de remoção de sombra para imagens aéreas. O método vai possibilitar avaliar e comparar resultados dos algoritmos de detecção e remoção de sombra.

1.2 OBJETIVO GERAL

O objetivo principal deste trabalho é desenvolver um método de avaliação de técnicas de remoção de sombras em imagens aéreas para sistemas WAMI.

Objetivos específicos foram definidos para acompanhar o progresso do estudo:

- Desenvolver um modelo em escala que simule uma cena para imagens aéreas que leve em conta o tamanho do pixel no chão (GSD).
- Iluminar o modelo de forma a simular a radiação solar que atinge a superfície terrestre, levando em conta o efeito atmosférico de dispersão da luz .
- Gerar imagens da mesma cena com sombra e sem sombra.
- Criar máscaras de sombra para cada par de imagem.
- Implementar método que compare a imagem sem sombra (considerada ideal) com a imagem gerada por técnicas de remoção de sombra, quantificando a detecção de sombra e a sua remoção.

1.3 ESTRUTURA

A dissertação está organizada na seguinte forma, na Seção 2 estão explicados os fundamentos teóricos que dão embasamento á metodologia aplicada. Na Seção 3 é apresentada a metodologia aplicada a este trabalho. Na Seção 4 são apresentados os resultados dos testes desde a geração da imagem dos *data sets* de imagens até a avaliação de métodos de remoção de sombra. Finalmente na Seção 5 é apresentada a conclusão deste trabalho.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Para descrever este projeto em detalhes, serão discutidos diversos conceitos para criar a fundamentação teórica deste trabalho.

2.1 FOTOGRAFIA AÉREA

Aerofotografia ou fotografia aérea consiste no registro de imagens do solo em uma posição elevada ou diretamente acima do objeto por meio de câmera fotográfica instalada a bordo de um dispositivo aéreo (avião, drone, balão, etc) de forma a obter uma vista superior (PAINÉ; KISER, 2003). As imagens podem ser classificadas pelo ângulo entre o eixo óptico da câmera e o eixo normal ao solo sendo:

- Vertical ou Nadiral, onde a câmera esta direcionada a no máximo 3° do eixo normal.
- Inclinação, uma vista de até 30° em relação ao eixo normal ao solo.
- Oblíqua, se maior que 30° em relação ao eixo normal.

Pode-se classificar a fotografia aérea quanto ao tipo de câmera utilizada, parâmetros como faixa de banda espectral e canais de sensibilidade espectral. Câmeras comuns utilizam sensores com resposta na faixa de luz visível com 3 canais de absorção vermelho, verde e azul (R, G, B), semelhante ao olho humano. Outra característica é a resposta espectral que indica a quantidade e a largura das bandas espectrais que o sensor pode discriminar (ZANETTI et al., 2017). A radiação recebida em cada pixel do sensor passa por uma codificação digital, obtendo um valor numérico, expresso em bits, denominado de Número Digital.

2.1.1 Fotogrametria aérea

Fotogrametria aérea é o campo da fotografia aérea aplicada à técnica de extrair, a partir de fotografias, as métricas, a forma, as dimensões e a posição dos objetos. Geralmente é dividida em aquisição da imagem, georreferenciamento, medições e correções radiométricas da imagem (HONKAVAARA et al., 2009). Na fotogrametria aérea o comprimento focal é fixo e a resolução espacial da imagem depende da distância da câmera ao chão.

2.1.2 Ground sample distance (GSD)

A resolução espacial de uma imagem aérea depende da área no chão que cada pixel da imagem irá representar. O tamanho do pixel no chão define se será possível detectar um objeto, também conhecido como taxa de amostragem. O Ground sample distance (GSD) é uma medida usada em fotogrametria, medindo a distância entre dois pixel no chão (LEACHTENAUER; DRIGGERS, 2001). Na engenharia é relacionada à taxa de amostragem do sinal. Uma representação esquemática pode ser vista na Figura 1. O GSD é calculado por:

$$GSD = \frac{p}{f} R \quad [\text{Pés ou metros}] \quad (2.1)$$

Onde p é o pitch, distância entre o centro de dois pixel obtido pela Equação (2.2), f é a distância focal R , distância entre o solo e o ponto focal.

$$p = \frac{Sw}{imW} \quad (2.2)$$

Onde Sw é a largura do sensor e imW é o número de colunas da matriz de pixels.

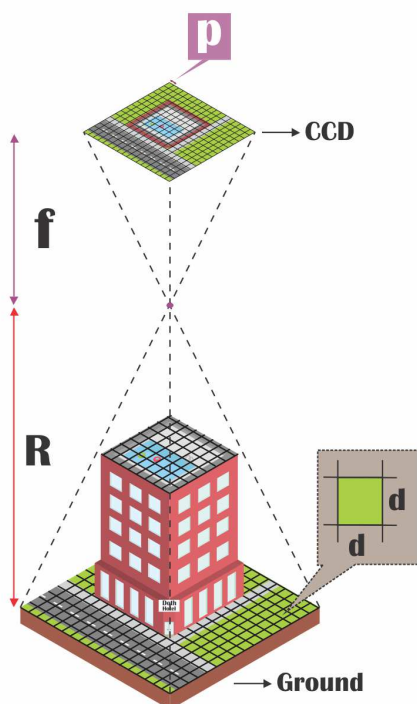


Figura 1 – Representação esquemática do tamanho de pixel no chão (GSD).

Fonte: O Autor (2018).

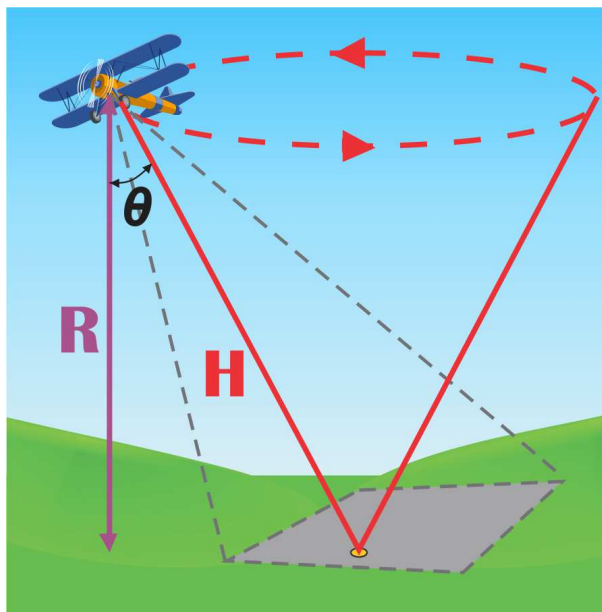


Figura 2 – Desenho esquemático do sistema WAMI exemplificando a altura e rota de voo em função da imagem a ser adquirida.

Fonte: O Autor (2018).

2.2 WAMI

Wide Area Motion Imagery (WAMI) é um sistema de imageamento aéreo em tempo real usado para aplicações que requerem decisões críticas, informações como movimento de multidões, análise de tráfego e controle de fronteiras (BLASCH et al., 2014). Esta dissertação utiliza o sistema WAMI da empresa Transparent Sky™, o qual é independente do veículo aéreo e pode ser utilizado em veículos aéreos não tripulados (VANT) ou tripulados como aviões e helicópteros. O equipamento utiliza uma câmera digital de espectro de luz visível (RGB), que captura 4 quadros por segundo em uma resolução de (6600X4400) Pixel de 3 canais com resolução do pixel de 8 bits (IMPERX, 2017), cobrindo uma área de 6,5 km² com um tamanho de pixel no chão (GSD) por volta de 25 cm. Lentes de 85 mm e 100 mm são utilizadas dependendo da altura de voo em questão. O desenho da Figura 2 exemplifica o sistema WAMI.

2.3 CARACTERÍSTICAS DA SOMBRA

Sombras são formadas quando o espectro eletromagnético emitido de uma fonte de luz é bloqueada por um objeto, causando regiões de baixa luminosidade ou intensidade denominada umbra. Fontes estendidas de luz, como o sol, geram um efeito gradual de transição entre uma área sombreada para uma área iluminada chamado de penumbra.

Sombras podem ser categorizadas em duas classes, as sombras projetadas (*cast-shadows*) é a área projetada pelo objeto na direção direta da luz, onde ocorre a projeção

de um objeto a outro objeto. A sombra da face não iluminada (*self-shadow*) onde o próprio objeto que bloqueia a luz gera a sombra no lado não iluminado do próprio objeto (SALVADOR; CAVALLARO; EBRAHIMI, 2004). A Figura 3 mostra as classificações das sombras.

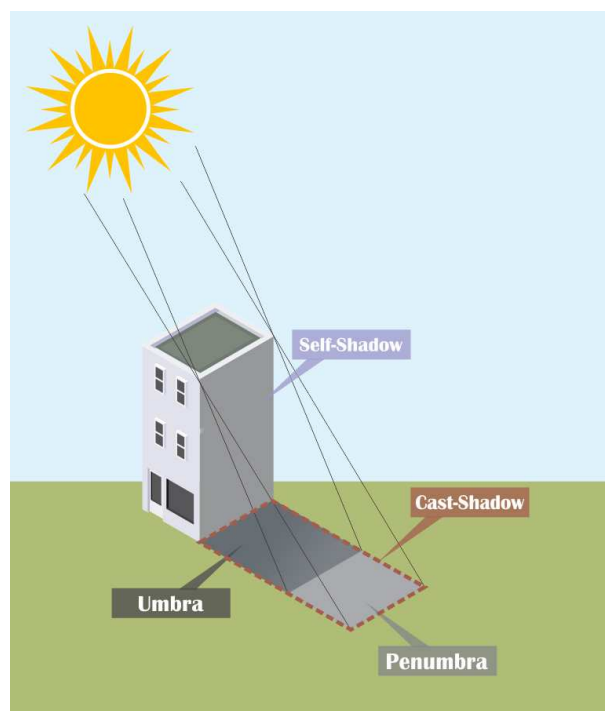


Figura 3 – Características da sombra, localização da self-shadow e cast-shadow com umbra e penumbra.

Fonte: O Autor (2018).

Sombras são importantes parâmetros para identificar objetos, formas, tamanhos e movimento (KHAN et al., 2016). Em imagens aéreas, sombras não são desejadas, visto que degradam a performance de algoritmos de monitoramento aéreo, análise de cenas e rastreamento de objetos. Em imagens aéreas, sombras tem as seguintes propriedades:

- Baixa luminância (intensidade) devido ao bloqueio da radiação solar (TSAI, 2006).
- Alta saturação do comprimento de onda entre o azul e o violeta devido ao efeito Rayleigh (POLIDORIO et al., 2003). Aprofundado na Seção 2.3.1.
- Devido à baixa quantidade de fótons que sensibiliza o pixel do sensor, a relação sinal-ruído (SNR) diminui (ZHU et al., 2010).

2.3.1 Efeito Rayleigh

O efeito Rayleigh de dispersão da luz solar na atmosfera é a principal razão pela qual o céu é azul. O efeito descreve a dispersão da luz ou qualquer outra radiação ele-

tromagnética por partículas muito menores que o comprimento de onda dos fótons dispersados. Se o tamanho das partículas é maior que o comprimento de onda, a luz não se decompõe em suas componentes cromáticas e todos os comprimentos de onda são igualmente dispersados (MCCARTNEY, 1976).

O espalhamento é dependente do inverso na quarta potencia do comprimento de onda (λ), como visto na Equação 2.3. O menor comprimento de onda no espectro de luz visível está na faixa de 400nm e representa a cor violeta (LILIENFELD, 2004).

$$\frac{I}{I_0} = \frac{9\pi^2}{2} \left(\frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} \right)^2 (1 + \cos^2 \theta) \frac{nV^2}{\lambda^4 r^2} \quad (2.3)$$

Onde I e I_0 são irradiações (não polarizadas) espalhadas e incidentes, respectivamente, ϵ é a permissividade dielétrica da partícula em relação ao meio, θ é o angulo de espalhamento, n é o numero de partículas espalhadas, V é o volume da partícula, λ é o comprimento de onda de luz incidente e r é a distância entre as partículas espalhadas e o observador.

2.4 SIMULADOR SOLAR

Os simuladores solares são fontes de luz que emitem a distribuição espectral da luz solar para uma variedade de ambientes. A norma IEC 60904-9 e o padrão ASTM E927-10 são as diretrizes de especificação para teste de células fotovoltaicas (Oriol Instruments, 2015). A figura 4 apresenta quatro padrões de espectro para simulação de irradiação solar:

- AM0 é a irradiação fora da atmosfera planeta terra.
- AM1.5G (global), leva em conta o espectro de irradiação direta e difusa que chega a superfície da terra.
- AM1.5G (direct), é a componente de irradiação direta que atinge a superfície da terra.
- AM1.5G (difuse), é o espectro de irradiação difusa que chega a superfície da terra.

2.5 ÍNDICE DE REPRODUÇÃO DE COR

A reprodução de cores de diferentes fontes de radiação é quantificada pelo índice de reprodução de cores (IRC), ela é utilizada para medir a fidelidade de cor que a iluminação reproduz nos objetos. A escala relaciona a emissão da fonte de luz em comparação com a radiação solar (GUO; HOUSER, 2004). Quanto mais próximo de 100 o IRC de uma

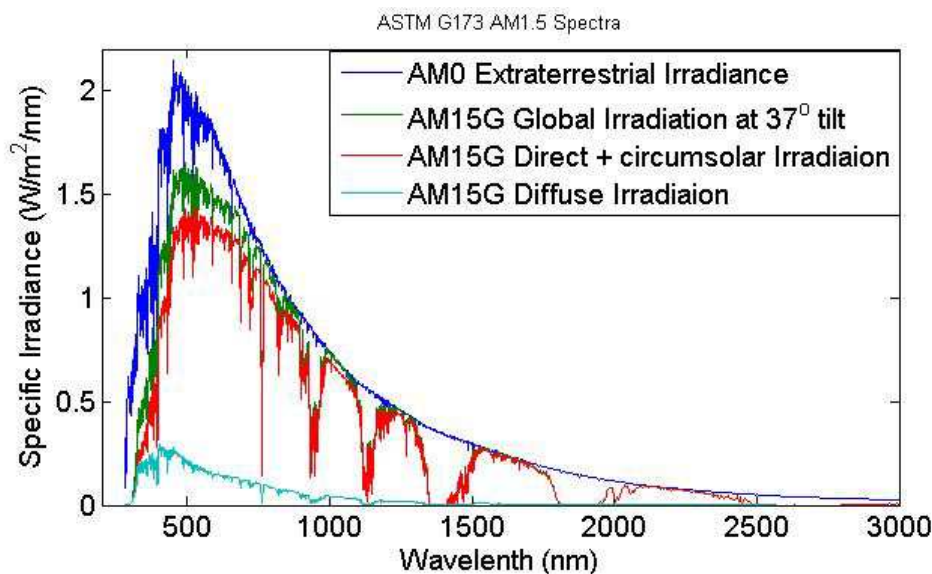


Figura 4 – Padrão espectral para simuladores solares, utilizados para avaliação de células fotovoltaicas .

Fonte:(R.ANDREWS, 2011)

lâmpada for, significa que ela reproduz mais fielmente as cores que enxergamos com a luz do dia.

2.6 RADIOMETRIA

Radiometria é a ciência de medir e descrever a propagação da radiação eletromagnética, incluindo a luz visível, como visto na Figura 5. Técnicas radiométricas descrevem a distribuição da potência da radiação no espaço, ao contrário das técnicas fotométricas, que caracterizam a interação da luz com o olho humano (ZALEWSKI, 1995).

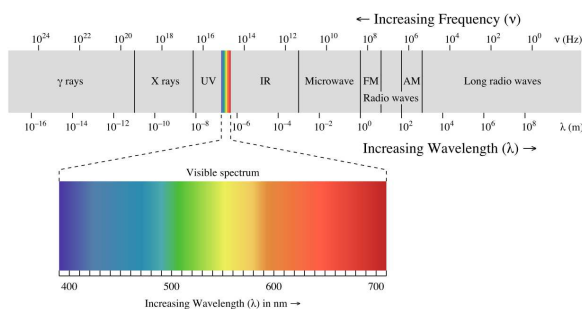


Figura 5 – Espectro de radiação eletromagnético .

Fonte:(RONAN, 2013)

2.7 SISTEMA VISUAL HUMANO

No olho, a luz atravessa a córnea, o humor aquoso, o cristalino e o humor vítreo e é projetada na retina, onde estão localizados os fotorreceptores. A retina contém fotorreceptores que podem ser divididos em dois tipos:

- Os bastonetes, formam o sistema escotópico (visão noturna), é a visão produzida pelo olho em condições de baixa luminosidade (AZEVEDO, 1996).
- Os cones, formam o sistema fotópico (visão diurna), são as células do olho humano que tem a capacidade de reconhecer as cores (AZEVEDO, 1996). Resposta fotométrica dos cones pode ser vista na Figura 6. O sistema visual humano fotóptico é composto de três tipos de cones:
 - O primeiro tem valores máximos de absorção da luz nos comprimentos de onda longos (L-cones) de 575nm.
 - O segundo tem valores máximos de absorção da luz nos comprimentos de onda médio (M-cones) 535nm.
 - O terceiro tem valores máximos de absorção da luz nos comprimentos de onda curta (S-cones) 445nm.

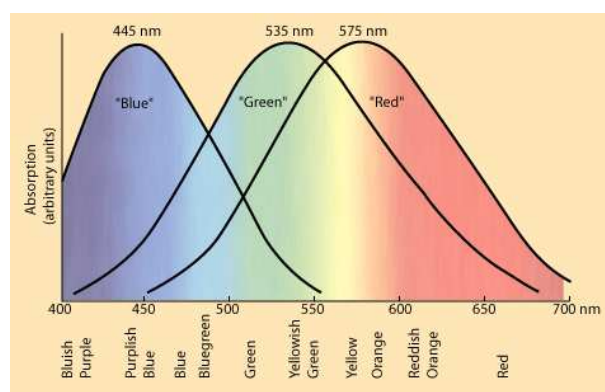


Figura 6 – Resposta fotométrica do sistema visual humano com *S-cones* com pico de absorção em 445nm *M-cones* com pico de absorção em 535nm *L-cones* com pico de absorção em 575nm (NAVE, 2012).

2.8 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE QUALIDADE DE IMAGEM

O termo qualidade da imagem é uma característica de uma imagem digital que mede a degradação da imagem (tipicamente comparada com uma imagem ideal ou perfeita). Sistemas de aquisição, processamento e projeção de imagens podem introduzir distorções ou artefatos no sinal. As medidas mais simples de erro são o erro médio quadrático (MSE) e a correspondente razão Sinal-Ruído de Pico (PSNR) (LIN et al., 2013).

O erro médio quadrático (MSE) é dado pela Equação 2.4 onde I representa a imagem ideal enquanto R , a restaurada (HORE; ZIOU, 2010).

$$MSE(I, R) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} [I(x, y) - R(x, y)]^2 \quad (2.4)$$

A razão Sinal-Ruído de Pico (PSNR) é a relação entre a máxima potência possível de um sinal e o MSE - é dada pela Equação 2.5 onde K é o máximo valor que um pixel pode ter. Devido à grande diferença na variação de sinais, a PSNR é expressada em escala logarítmica (HORE; ZIOU, 2010).

$$PSNR(I, R) = 10 \log_{10} \left(\frac{K^2}{MSE(I, R)} \right) \quad (2.5)$$

2.8.1 Método de Similaridade Estrutural (SSIM)

O índice de similaridade estrutural (SSIM) compara a semelhança de duas imagens, sendo uma considerada ideal e outra modificada (BRUNET; VRSCAY; WANG, 2012). SSIM foi desenvolvido para aprimorar métodos tradicionais de avaliação de qualidade de imagem como a razão Sinal-Ruído de Pico (PSNR) e o erro médio quadrático (MSE). A diferença entre as técnicas é que o MSE e a PSNR são aproximações de erro absoluto e, por outro lado, o SSIM é um modelo baseado em percepção que considera a degradação da imagem como uma mudança percebida na informação estrutural, levando em conta também fatores como mascaramento de luminância e contraste.

A informação estrutural é a ideia de que os pixels possuem interdependências fortes, especialmente quando estão espacialmente agrupados. A interdependência dos pixels contém informações importantes sobre a estrutura do objeto. O mascaramento de luminância ocorre quando distorções da imagem tendem a ser menos visíveis em regiões brilhantes, enquanto o mascaramento de contraste ocorre quando as distorções perdem visibilidade onde há textura.

O índice é calculado ponderando os componentes de luminância $L(I, R)$, definida na Equação 2.6; contraste $C(I, R)$ definido na Equação 2.7; e estrutura $S(I, R)$ definida na Equação 2.8. As variáveis I e R correspondem à imagem considerada ideal e à imagem restaurada, μ representa a média enquanto σ é o desvio padrão da imagem. $\sigma_{I,R}$ representa a covariância entre as imagens ideal e restaurada. As constantes C_1 , C_2 e C_3 são utilizadas para evitar instabilidade quando o denominador tende a zero (WANG et al., 2004).

$$L(I, R) = \frac{2\mu_I\mu_R + C_1}{\mu_I^2 + \mu_R^2 + C_1} \quad (2.6)$$

$$C(I, R) = \frac{2\sigma_I + \sigma_R + C_2}{\sigma_I^2 + \sigma_R^2 + C_2} \quad (2.7)$$

$$S(I, R) = \frac{\sigma_{I,R} + C_3}{\sigma_I + \sigma_R + C_3} \quad (2.8)$$

Combinando as componentes de similaridade temos o SSIM definido na Equação 2.9, onde os parâmetros de α , β e γ são estabelecidos em 1 (WANG et al., 2004)

$$SSIM(I, R) = [L(I, R)]^\alpha [C(I, R)]^\beta [S(I, R)]^\gamma \quad (2.9)$$

3 METODOLOGIA

3.1 Modelo em Escala

Para criar uma cena simulada de uma imagem aérea adquirida pelo sistema WAMI, foi necessário ajustar a escala da cena e o sistema óptico da câmera, sem alterar características importantes como o tamanho do pixel no chão (GSD). Três operações são necessárias para ajustar a cena de forma a criar uma imagem com os mesmos parâmetros das imagens adquiridas pelo sistema WAMI.

- Mudança da câmera fotográfica e do comprimento focal da lente
- Escala da maquete
- Decimação da imagem adquirida

As imagens obtidas pelo sistema WAMI são adquiridas de uma altitude de voo de 5.000 a 12.000 pés. Considerando que uma cena aérea adquirida de um avião não pode ser nadiral, ou seja, uma vista de topo, escolheu-se o ângulo de $\theta = 60^\circ$ em relação ao eixo normal.

O valor médio de GSD para o sistema WAMI é de 25cm . O mesmo parâmetro será utilizado para o sistema de validação, o qual utiliza outra câmera com resolução de 6000X4000 pixel e distância focal de 24 mm. A Tabela 1 compara a câmera Nikon D3400 com a câmera utilizada no sistema da Transparent Sky™.

Tabela 1 – Distância entre pixel no CCD da câmera WAMI e na Nikon D3400

	Pitch
WAMI System, (IMPERX, 2017)	$4,72\mu\text{m}$
D3400 6000X4000,(NIKON, 2018)	$3,89\mu\text{m}$
Decimação 16:1 1500X1000	$15,56\mu\text{m}$

Aplicando o mesmo GSD com a câmera do sistema de validação na Equação 3.1 obtemos:

$$H = GSD_{WAMI} \frac{f}{p} \therefore H = 0,25 \frac{24 \times 10^{-3}}{15,56 \times 10^{-6}} = 385,6\text{m} \quad (3.1)$$

Na Equação 3.2 obtém a nova altura de voo (R).

$$R = H \times \cos(\theta) \therefore R = 385,6 \times \cos(60^\circ) = 192,8\text{m} \quad (3.2)$$

Então para ter o mesmo tamanho de pixel no chão (GSD) a câmera do sistema WAMI deve estar a uma altura de voo de 8.000 pés e a câmera D3400 com uma lente 24mm estaria voando a 192,8 metros de altura.

3.1.1 Escala da maquete

Para criar um ambiente controlado e gerar imagens com sombras e sem sombras, é necessário reduzir a escala do modelo. A Tabela 2 relaciona a área do modelo e altura da câmera em função da escala em diversos tamanhos de pixel no chão.

Tabela 2 – A relação entre a escala do modelo, a distância da câmera (R) e a área imageada (FOV) em função do tamanho de pixel no chão (GSD).

	Escala 1:1		Escala 1:200	
	H	FOV	H	FOV
GSD 0,15m	231,36	225X150	1,16	1,125X0,75
GSD 0,25m	385,6	375X250	1,93	1,875X1,25
GSD 0,35m	539,85	525X350	2,70	2,625X1,75

Avaliando as escalas propostas na Tabela 2, a proporção de 1 : 200 é a que melhor se encaixa fisicamente no ambiente disponível. Visto que para cada valor de GSD avaliado a área aumenta proporcionalmente, A área mínima definida é de $1,4m \times 1,0m$ possibilitando aumentar a área imageada agrupando modelos, como na Figura 7.

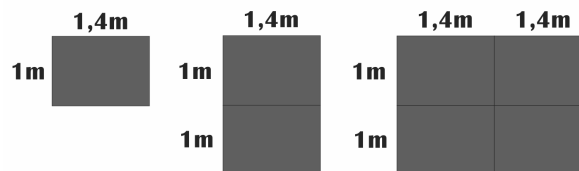


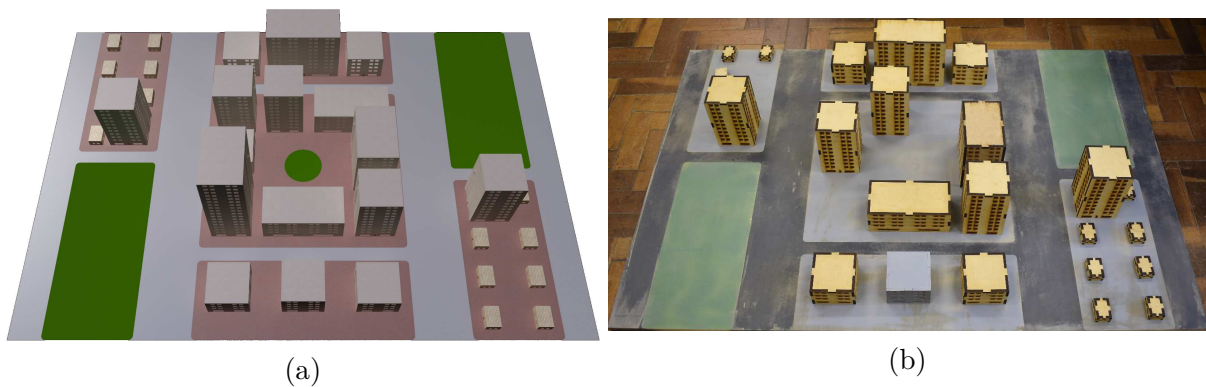
Figura 7 – (Modo de agrupamento dos modelos em escala) (O autor, 2017).

O modelo antes de ser construído foi simulado em CAD que pode ser visto na Figura 8a e em seguida montado o modelo físico como visto na Figura 8b.

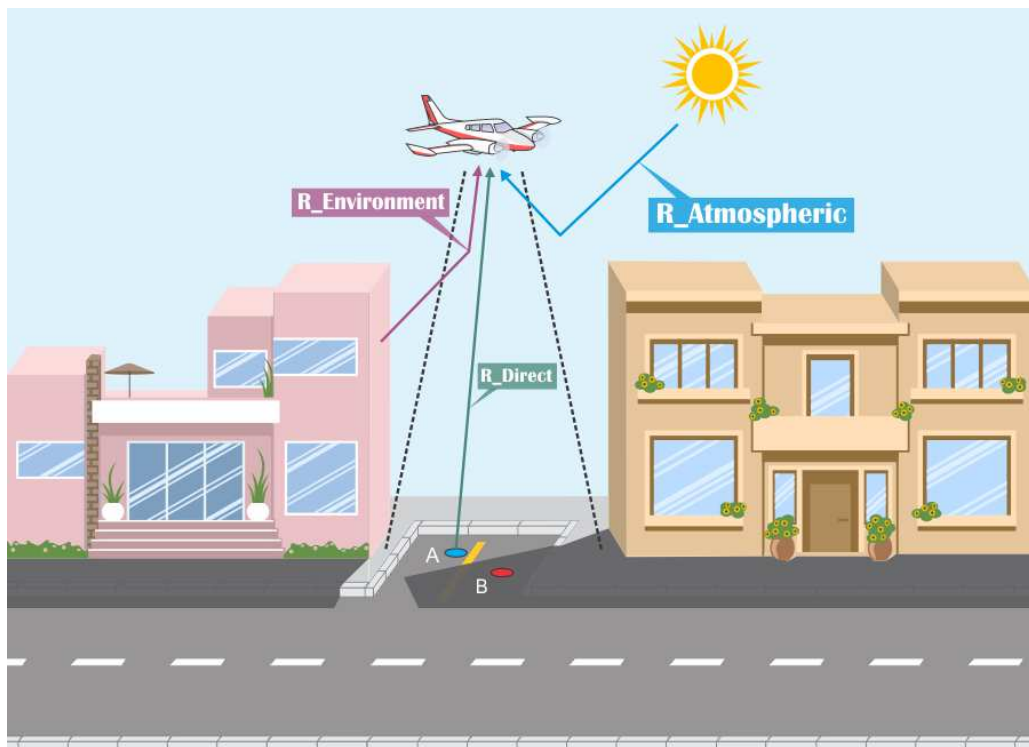
3.2 SISTEMA DE ILUMINAÇÃO

De modo a criar cenas com e sem sombra, foi necessário criar um sistema de iluminação que contemple todas as componentes de iluminação de uma imagem aérea. Na Figura 9 estão caracterizadas as radiações que atuam no sensor da câmera, onde a radiação direta (R_{direct}) é a reflexão da luz solar, a radiação atmosférica ($R_{Atmospheric}$) é o espalhamento da luz na atmosfera, explicado como efeito Rayleigh, e a radiação do ambiente ($R_{Environment}$).

Figura 8 – Modelo em escala de 1:200 (a) simulação em CAD (b) modelo físico.



Fonte: O Autor (2018).

Figura 9 – Radiações que atuam no sensor da câmera de um sistema WAMI. Radiação direta (R_{direct}) é a reflexão da luz solar. Radiação atmosférica ($R_{Atmospheric}$) é o espalhamento da luz na atmosfera, explicado como efeito Rayleigh, e a radiação do ambiente ($R_{Environment}$) que envolve o entorno.

Fonte: O Autor (2017).

Para criar a imagem com sombra utilizamos uma fonte de iluminação para simular a radiação solar direta e uma fonte de luz de curto comprimento de onda para simular o espalhamento da luz na atmosfera. Para a fonte direta foi utilizada uma lâmpada halógena da Osram™, com índice de reprodução de cor de 100 (OSRAM, 2017). Para a luz difusa é utilizada um filtro de gelatina na cor azul para emular o efeito de Rayleigh. O conceito

do sistema de iluminação para geração de sombras pode ser visto na Figura 10.

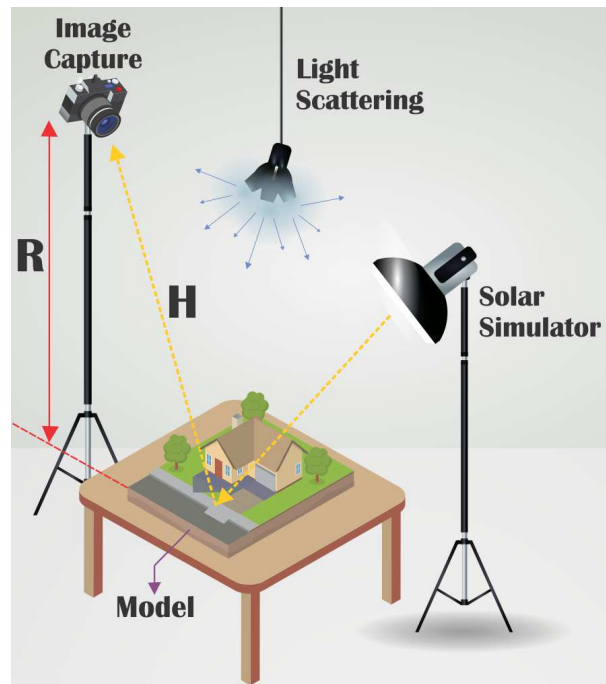


Figura 10 – Conceito de cena com sombra, utilizando luz direta e difusa em baixo comprimento de onda.

Fonte: O Autor (2018).

Para criar uma cena sem sombra, utilizamos uma fonte de iluminação simulando a radiação solar indireta. Para a fonte indireta foi utilizada uma lâmpada halógena da Osram™, com índice de reprodução de cor de 100 (OSRAM, 2017), a luz emitida pela lampada foi refletida em uma superfície para espalhar os raios de luz, como pode ser visto na Figura 11.

3.3 DATA SETS DE IMAGENS

Para avaliar a detecção de sombra em uma imagem foi necessário fazer um conjunto de imagens, onde algumas imagens foram geradas a partir do modelo em escala e outras imagens derivadas destas imagens adquiridas. As imagens do modelo em escala foram obtidas fixando a câmera de modo que as imagens representem a mesma área imageada, dispensando o registro da imagem. As imagens adquiridas que compõem o *data set* são:

- Imagem Original: Imagem com sombra da maquete completa com prédios, árvores, pessoas e carros
- Imagem Ideal: Imagem sem sombra da maquete completa com prédios, árvores, pessoas e carros

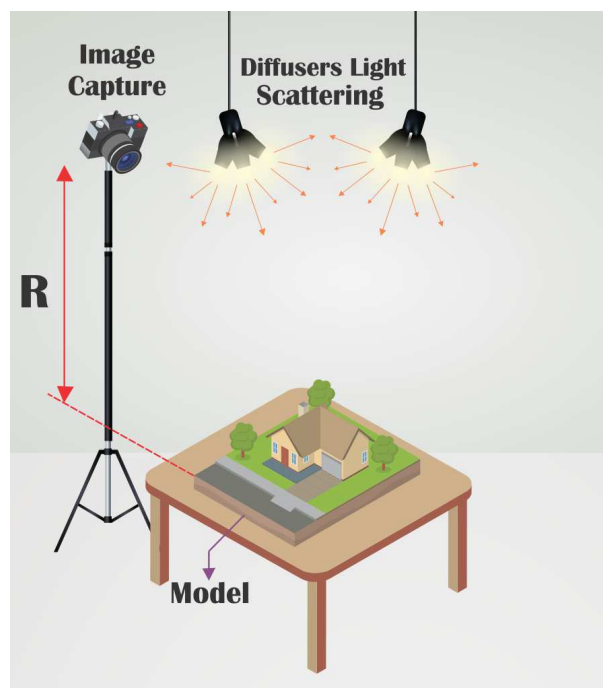


Figura 11 – Conceito de cena para criar a imagem considerada ideal sem sombra, utilizando apenas luz difusa.

Fonte: O Autor (2018).

As imagens derivadas deste *data set* auxiliam tanto na avaliação da modificação da imagem pelos algoritmos de remoção de sombra. A principal imagem derivada é a máscara de sombra que é a diferença entre a imagem com e sem sombra da maquete, ela é gerada por uma subtração pixel à pixel de uma imagem pela outra gerando um valor de diferença e criando uma imagem binária que evidencia a região de sombra da imagem com sombra. A máscara de sombra é importante para avaliar a precisão dos algoritmos na detecção de sombras.

3.4 ALGORITMOS AVALIADOS

A escolha dos algoritmos avaliados leva em conta métodos previamente desenvolvidos e implementados pelo grupo de pesquisa *The shadow problem*.

3.4.1 Método Otsu

O algoritmo desenvolvido para imagens aéreas (SILVA et al., 2017) utiliza o método de Otsu (OTSU, 1979). É um método de determinação de limiar automático, aplicado ao histograma de uma imagem, que separa a imagem em duas classes. A ideia é aproximar o histograma de uma imagem por duas funções Gaussianas e escolher o limiar de forma a minimizar a variância intra-classes. Cada classe possui suas próprias características, ou seja, sua média e desvio-padrão.

3.4.2 Método K-means

K-means Clustering é um algoritmo de aprendizagem de máquinas sem supervisão, que visa maximizar a variância entre classes organizando os dados em *K* clusters. Tais agrupamentos separam grupos de pixel de acordo com seus níveis de intensidade. O algoritmo original, proposto por (MACQUEEN, 1967), consiste em escolher grupos *K* (clusters), cada um dos quais inicialmente contém um único ponto aleatório (ou determinado pelo usuário, também chamado de cluster center) e, posteriormente, cada novo ponto é adicionado ao grupo cuja média é mais próxima do referido ponto. Cada iteração, ou adição de um ponto, recalcula a média do grupo ao qual o ponto foi adicionado. Os *K* são, de fato, os meios dos clusters que eles representam.

3.4.3 Método Gong

O método interativo de Gong (GONG; COSKER, 2016) necessita que para a detecção da sombra o usuário defina alguns pixel de região sombreada e outros de região iluminada. A remoção de sombra é feita registrando as regiões de penumbra da imagem a um frame normalizado.

3.5 MÉTODO DE AVALIAÇÃO DE ALGORÍTIMOS DE DETECÇÃO DE SOMBRA

O método utilizado para avaliar a detecção de sombras segue o conceito de matriz de erro ((LILLESAND; KIEFER, 2000)) ou também conhecido como matriz de confusão ((FAWCETT, 2006)) sendo uma matriz que contém o total de erros e acertos ao comparar duas imagens binárias, descrita na Equação 3.3.

$$ConfusionMatrix = \begin{bmatrix} TruePositives & FalsePositives \\ FalseNegatives & TrueNegatives \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Onde *True Positives (TP)* significa acerto na parte positiva da imagem, *True Negatives (TN)* significa acerto na parte negativa da imagem, *False Positives (FP)* significa erro na parte positiva da imagem e *False negative (FN)* significa erro na parte negativa da imagem.

Para avaliar a detecção de sombras comparamos a imagem com a sombra removida pelo algoritmo avaliado com a imagem original com sombra, com a diferença entre as imagens geramos uma imagem binária revelando os pixel modificados. A máscara de sombras gerada no *data set* é utilizada como sendo a imagem ideal e comparada com a imagem binária modificada do algoritmo em teste. A comparação entre imagens além de

valores quantitativos cria um mapa onde se evidenciam os pixel classificados errados como na Figura 12.

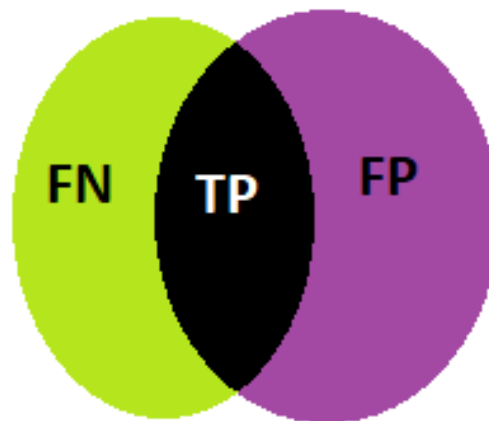
Figura 12 – Metodologia aplicada à detecção de sombras, comparação entre máscaras.

- (a) Máscara de sombras original. (b) Máscara de sombra do método avaliado.



- (c) Sobreposição de máscaras, onde TN significa acerto na região iluminada, TP acerto na região de sombra, FN o método avaliado considerou a região de sombra como área iluminada e FP o método avaliado considerou sombra uma região iluminada. .

TN



Fonte: O autor (2018).

A seguinte terminologia é usada (YAO; ZHANG, 2004):

1. Producer's Accuracies:

a) Shadow: $\eta_s = \frac{TP}{TP+FN}$

b) Non shadow: $\eta_n = \frac{TN}{TN+FP}$

2. User's Accuracies:

a) Shadow: $ps = \frac{TP}{TP+FP}$

b) Non shadow: $pn = \frac{TN}{TN+FN}$

3. Overall Accuracy:

$$\tau = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN}$$

Onde:

- *Producer's Accuracies* representa o quão correto está o método, indicando a correta classificação dos pixel em sombra ou área iluminada.
 - O η_s significa quanto de toda região de sombra da máscara de sombra original foi detectada pelo método avaliado.
 - O η_n significa quanto de toda região iluminada da máscara de sombra original foi detectada pelo método avaliado.
- *User's Accuracies* representa a precisão do método, indicando a probabilidade do pixel ser bem classificado como sombra ou não.
 - O ps significa o quanto que a máscara de sombra do método avaliado acertou a sombra da máscara de sombra original.
 - O pn significa o quanto que a máscara de sombra do método avaliado acertou a área iluminada da máscara de sombra original.
- τ leva em conta todos os acertos de regiões de sombra e iluminação em relação a toda imagem. Equivale ao coeficiente de similaridade de Jaccard (THADA; JAGLAN, 2013), é uma análise estatística da probabilidade do pixel ser classificado certo na comparação com a máscara de sombra.

A metodologia aplicada a avaliação da detecção de sombra é apresentada pelo fluxograma da Figura 13, onde a imagem original é comparada com a imagem com a sombra removida e posteriormente comparada com a máscara de sombras.

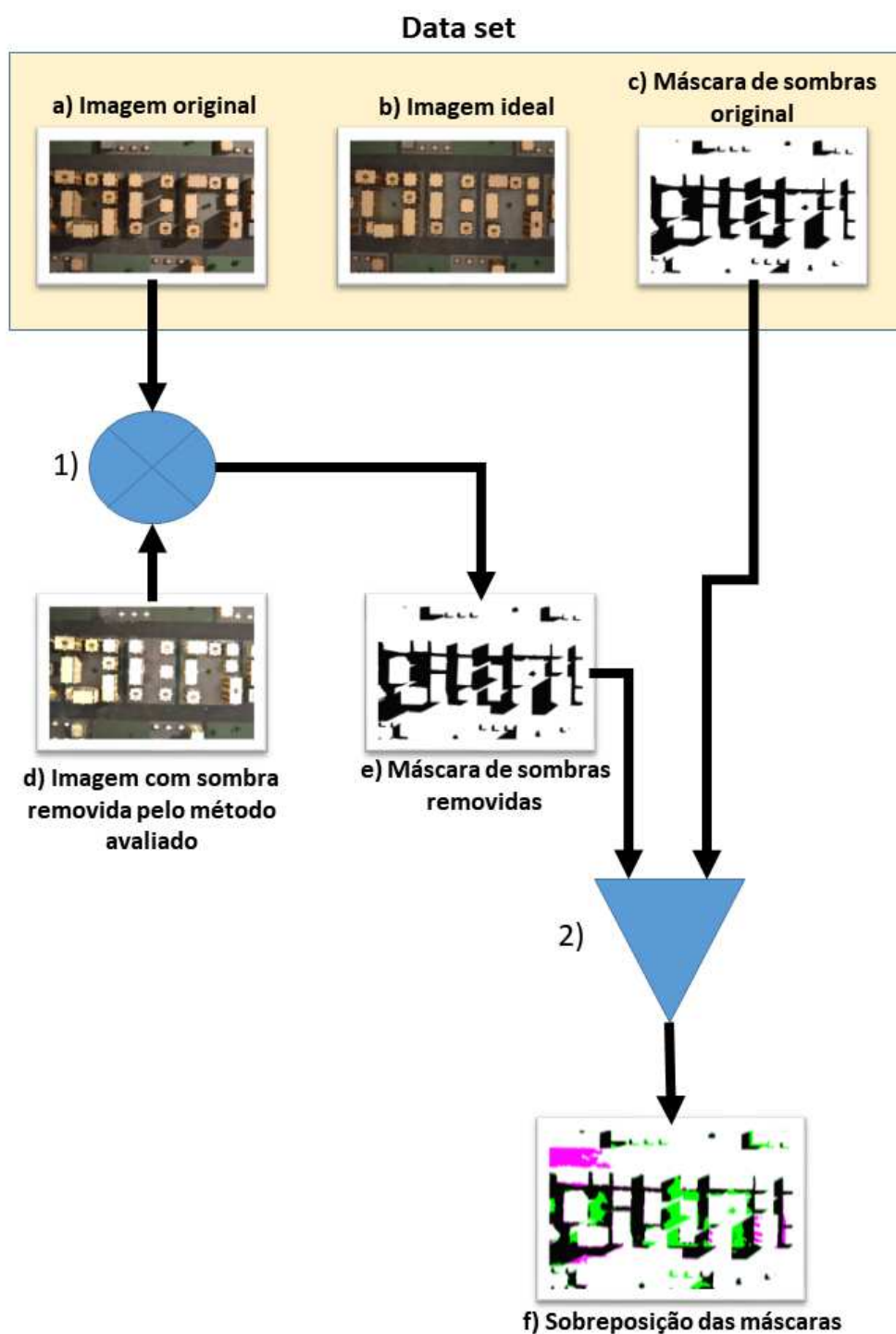
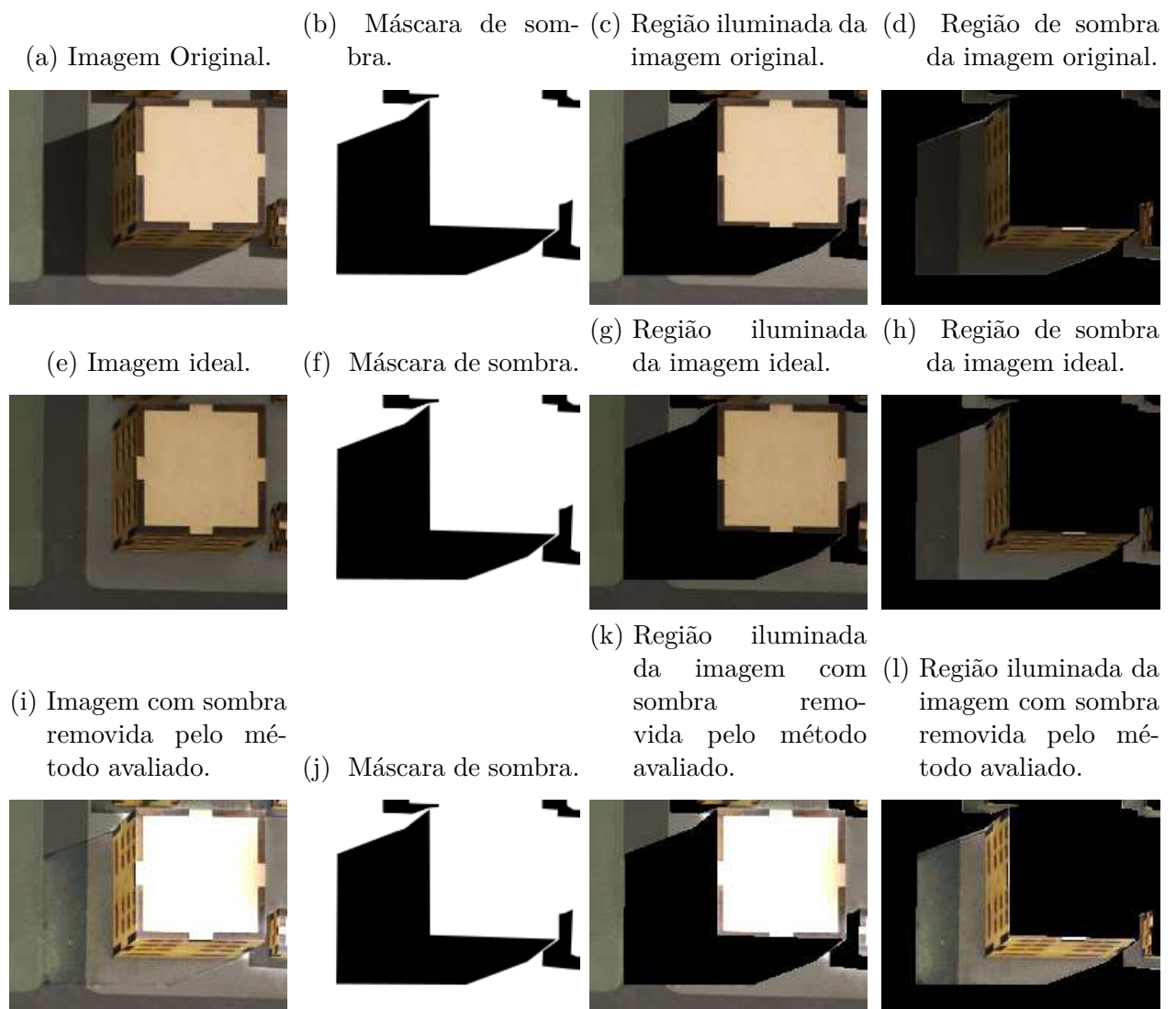


Figura 13 – Esquemático de avaliação de detecção de sombras. Subtraindo (1) a imagem ideal (a) da imagem com sombra removida pelo método avaliado (d), obtendo a máscara de modificações (e). Agrupa-se em (2) a máscara de sombras original (c) com a máscara de modificações (e), obtendo a sobreposição das máscaras (f). A sobreposição de máscara apresenta, em região em branco, regiões sem sombras que foram classificadas corretamente como regiões sem sombras, pelo método avaliado. Regiões em preto mostram regiões classificadas corretamente como sombra. Regiões em magenta correspondem erroneamente a regiões classificadas como sombra (falso positivo). Regiões em verde representam regiões de sombra não detectadas pelo algoritmo avaliado (falso negativo).

3.6 MÉTODO DE AVALIAÇÃO DE ALGORÍTIMOS DE REMOÇÃO DE SOMBRA

O método proposto para avaliar algoritmos de remoção de sombras em imagens aéreas utiliza o grupo de imagens *data set*. Para analisar a remoção de sombra foi dividido em duas partes, a remoção de sombra de partes sombreadas e a remoção de sombras de partes iluminadas. As imagens do *data set* foram recortadas utilizando a máscara de sombras original, Figura 14, cada uma gerando duas imagens distintas, da região iluminada e de sombra da imagem.

Figura 14 – Metodologia aplicada avaliação de re-iluminação da imagem com sombra, separando regiões de sombra de regiões iluminadas utilizando a máscara de sombras original



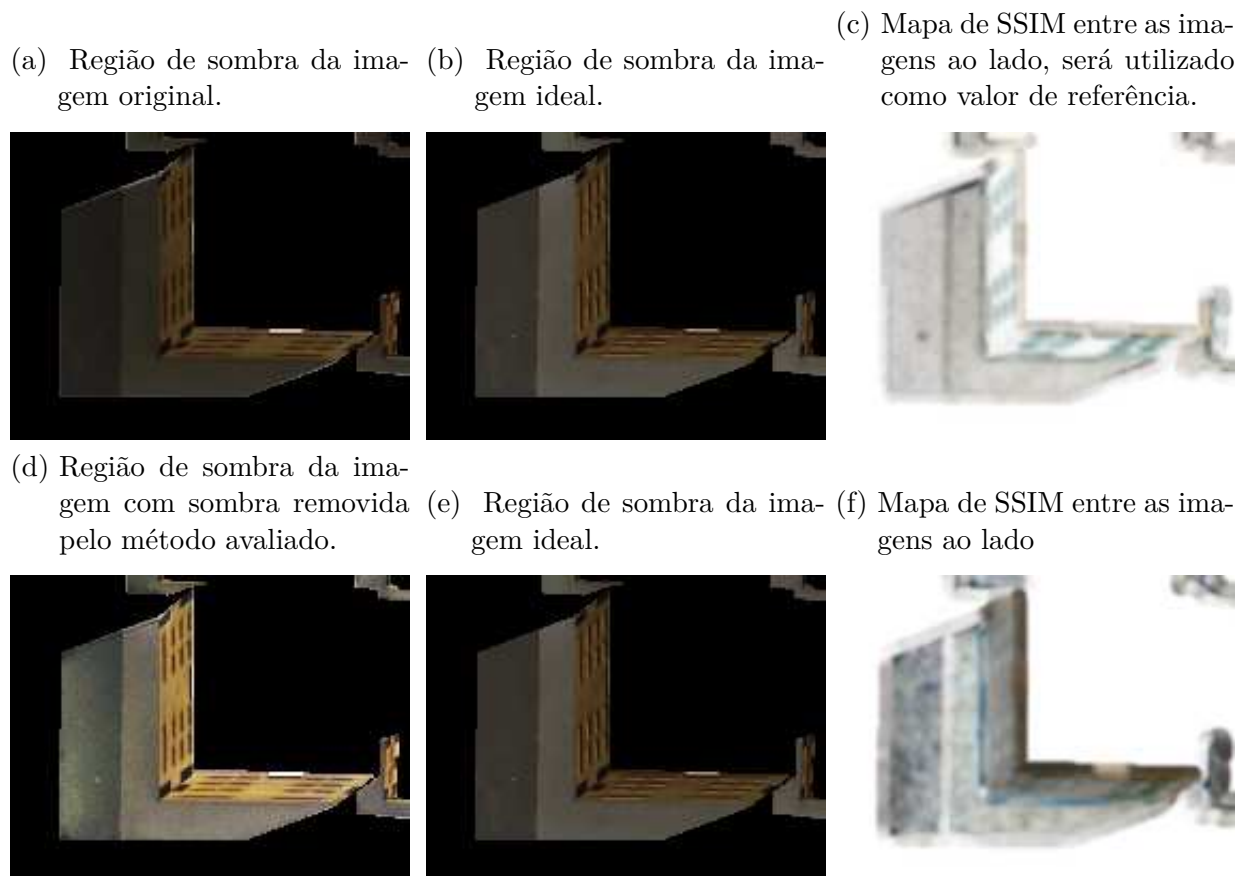
Fonte: O autor (2018).

A metodologia para avaliar a remoção de sombra da região de sombra é exempli-

ficada na Figura 15. A região de sombra original (Figura 15a) é comparada com a região de sombra ideal (Figura 15b), que foi recortada da imagem ideal utilizando a máscara de sombra original. A comparação é feita utilizando o índice de similaridade estrutural (Figura 15c), este valor será a referência para analisar se a região de sombra foi re-iluminada corretamente, visto no Capítulo 2.8.

A imagem avaliada com a sombra removida processada pelo método em avaliação (Figura 15d) foi recortada utilizando a máscara de sombras original. A região com sombra da imagem avaliada é comparada com o recorte da imagem ideal (Figura 15e) utilizando a máscara de sombra ideal, e o índice de similaridade estrutural (Figura 15f). Ao comparar o valor de SSIM da imagem de referência com a imagem avaliada conseguimos notar o quanto o método de remoção chegou perto da imagem ideal.

Figura 15 – Metodologia aplicada a avaliação de re-iluminação de regiões de sombra.

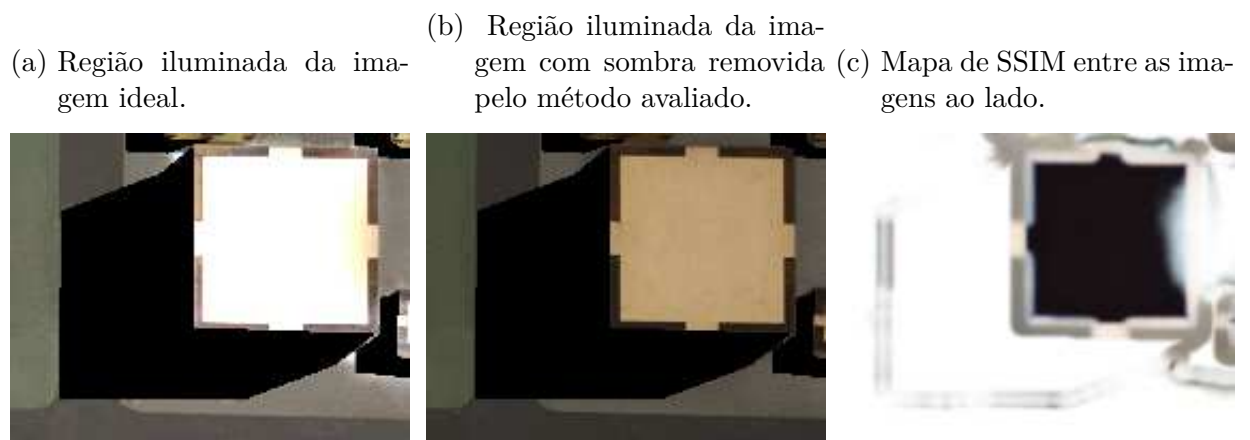


Fonte: O autor (2018).

3.6.1 Avaliação da re-iluminação em áreas sem sombras da imagem

Alguns métodos detectam regiões iluminadas da imagem como regiões de sombra e as modificam. O objetivo desta metodologia é avaliar quanto da região já iluminada (sem sombra) foi modificada erroneamente pelo algoritmo de remoção de sombras. O teste é feito utilizando o índice de similaridade estrutural (SSIM) entre a região iluminada da imagem ideal (sem sombra) (Figura 16a) e a região iluminada da imagem com sombra removida pelo método avaliado (Figura 16b), resultando no mapa de SSIM, mostrado na Figura 16c).

Figura 16 – Metodologia aplicada a avaliação de re-iluminação de regiões iluminadas.



Fonte: O autor (2018).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Seção 4.1 é apresentada a cena aérea montada para a aquisição de imagens. Na Seção 4.2 é apresentada o sistema de iluminação utilizado para gerar as imagens. Na Seção 4.3 é apresentado o método de geração da máscara de sombras. Na seção 4.4 são apresentados os *data sets* de imagens e a avaliação de detecção e remoção de sombras.

4.1 CENA AÉREA

O primeiro objetivo específico foi desenvolver um modelo em escala que simule uma cena para imagens aéreas, o qual leve em conta o tamanho do pixel no chão (GSD). A especificação técnica bem como os cálculos do modelo estão apresentados no Capítulo 3.1. Na Figura 17 é apresentada a simulação em CAD do modelo, posteriormente utilizado para simulação de imagens com e sem sombra, Figura 18.



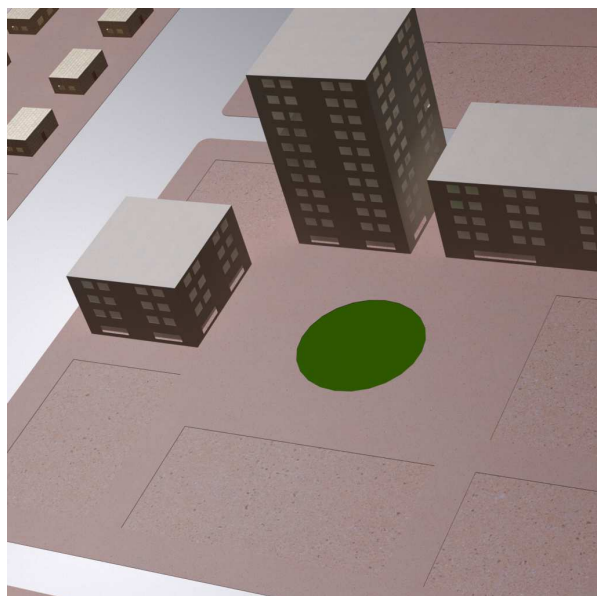
Figura 17 – Modelo em escala, projetado em CAD

Fonte: O Autor (2018).

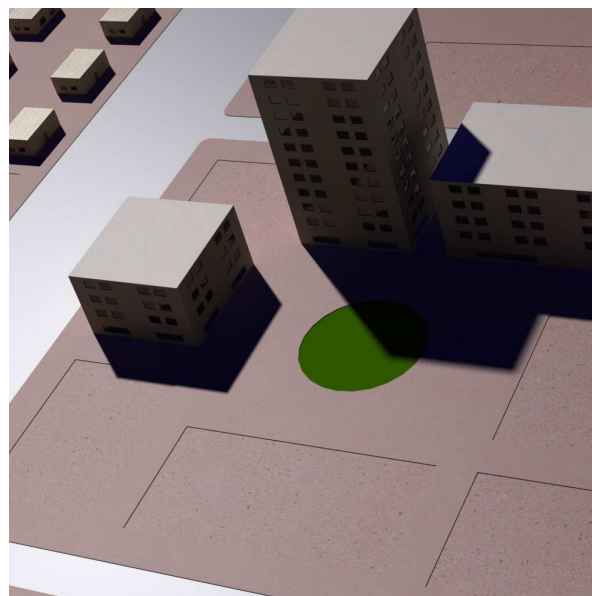
O modelo físico em escala é apresentado na Figura 19a, a aquisição da imagem apresentada segue o padrão de 25cm de GSD. O método para avaliar o GSD da imagem levou em conta o carro azul de 24mm de comprimento (Figura 19b), que está sendo apresentado em 19 pixel em uma escala de $1 : 200$, o cálculo é apresentado na Equação 4.1.

Figura 18 – Simulação de iluminação no modelo em CAD.

(a) Simulação sem sombra.



(b) Simulação com sombra.



Fonte: O autor (2018).

Figura 19 – Imagem adquirida do modelo em escala com específico GSD.

(a) Modelo físico de cena aérea em escala



(b) Carro de 24mm, representado por 19 pixel, gerando uma imagem com GSD de 25,2cm.



Fonte: O autor (2018).

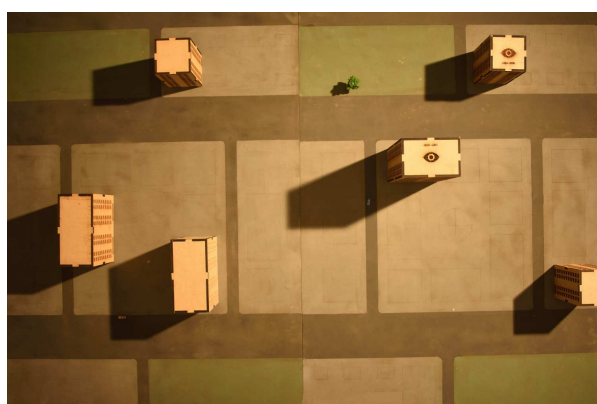
$$GSD_{final} = \text{escaladomodelo} \frac{\text{tamanhodocarro}}{\text{numerodepixeldocarro}} \therefore GSD_{final} = 200 \frac{24mm}{19} = 25,2cm \quad (4.1)$$

4.2 ILUMINAÇÃO

Diversas fontes de luz foram testadas para emular a iluminação solar. Apesar de gerar bons resultados, a utilização de luz solar real foi fundamental para avaliar os algoritmos. Na Figura 20 estão alguns testes com iluminação, na Figura 20a a iluminação é feita com lâmpadas halógenas, na Figura 20b foi utilizada uma lâmpada de temperatura de cor fria, na Figura 20c foi feita uma combinação de lâmpada fria com lâmpada halógena e na Figura 20d está a iluminação solar.

Figura 20 – Simulação de iluminação no modelo físico.

(a) Iluminação por lâmpada halógena.



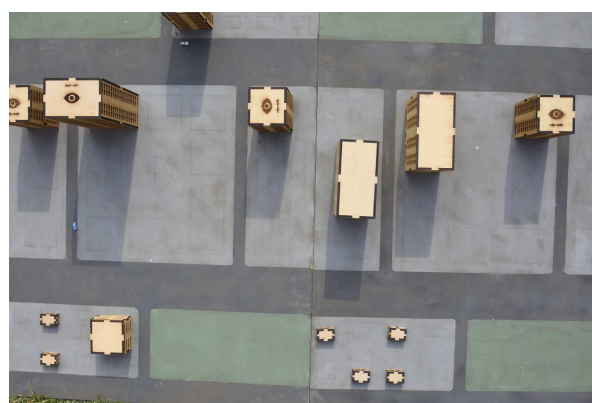
(b) Iluminação por lâmpada fria.



(c) Combinação de lâmpada fria com halógena.



(d) Iluminação solar.



Fonte: O autor (2018).

4.3 MÁSCARA DE SOMBRAS

O método de geração da máscara de sombras consiste em subtrair a imagem com sombra da imagem sem sombra, gerando uma imagem que evidencia regiões de sombra da imagem original. Para gerar a máscara de sombra é necessário binarizar esta imagem definindo um limiar entre pixel considerado preto ou branco. A imagem ideal não é perfeitamente homogênea, então acaba gerando ruído na máscara de sombras e se faz ne-

cessário remover estas regiões manualmente. A Figura 21 apresenta o processo de geração de máscara de sombra.

Figura 21 – Processo de geração de máscara de sombra.

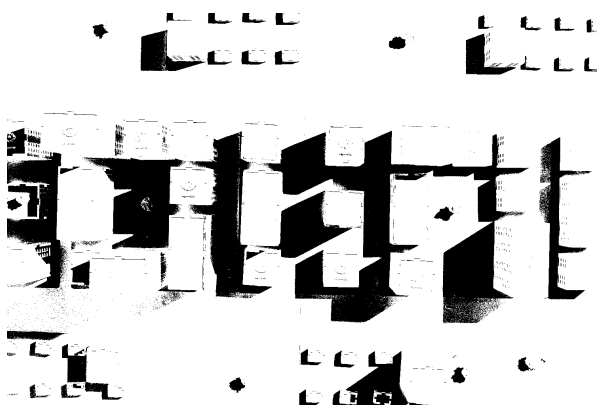
(a) Imagem com sombra.



(b) Imagem sem sombra.



(c) Imagem bruta da diferenciação das imagens acima e posterior conversão para binário.



(d) máscara de sombras limpa.



Fonte: O autor (2018).

4.4 AVALIAÇÃO DE MÉTODOS DE REMOÇÃO DE SOMBRA

Para cada conjunto de imagens denominados *data sets* são aplicados os métodos de remoção de sombra avaliados. Os resultados estão organizados por seções de *data sets*. Cada seção é composta pela subseção de avaliação da detecção de sombra, descrita no Capítulo 3.5, a subseção avaliação da re-iluminação da imagem, descrita no Capítulo 3.6 e a subseção de discussão dos resultados obtidos.

4.4.1 Data set 1

O *data set 1* foi adquirido em ambiente interno, com iluminação artificial. Na Figura 22a uma lâmpada halógena de 500W foi utilizada como fonte de luz direta para criar a sombra. Na Figura 22b foi utilizada uma lâmpada halógena de 1000W, direcionada para o teto do laboratório, criando a cena sem sombra. A máscara de sombra foi criada pela diferença entre a imagem original com sombra e a imagem ideal sem sombra, também foi feito um pós-processamento na imagem de modo a deixar somente as sombras demarcadas, conforme Figura 22c.

4.4.1.1 Avaliação de detecção de Sombra

O método para avaliar a detecção de sombra na imagem, definido no capítulo 3.5, é aplicado para cada algoritmo avaliado, obtendo uma representação quantitativa conforme a Tabela 3. A representação qualitativa da detecção de sombra apresenta-se na forma de imagem, onde a máscara original e a máscara de detecção do algoritmo avaliado são sobrepostas e comparadas.

O resultado do método de Otsu representado na Figura 23, demonstra que o método não conseguiu detectar sombras na imagem e pn acaba tendo valor pois representa a área detectada como região iluminada.

O resultado do método de K-means representado na Figura 24 apresenta uma detecção de 70% na região de sombra e 93,92% na região iluminada.

O resultado do método de Gong representado na Figura 25 apresenta uma alta detecção de sombra (98,28%) porém erra ao considerar regiões iluminadas como sombra (54,25%).

Na avaliação da imagem geral (τ) K-means foi melhor que Gong e o método de Otsu não obteve resultado neste *data set*.

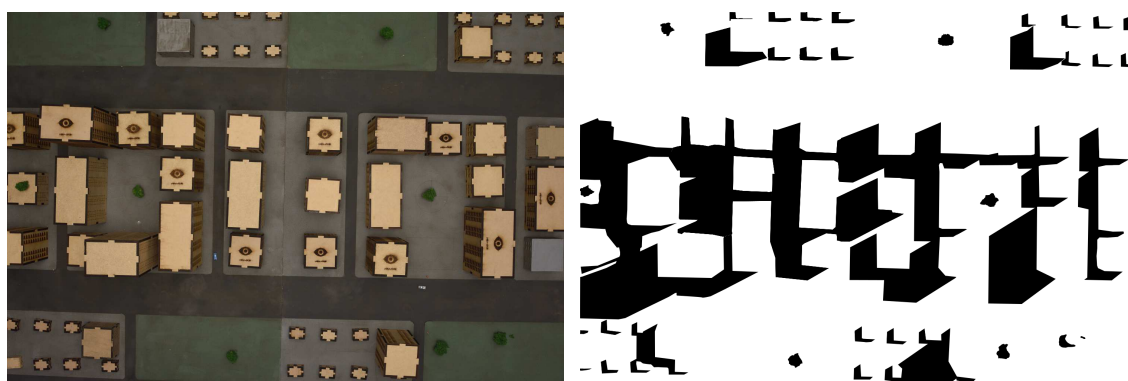
Figura 22 – *Data set 1*: Imagens adquiridas em ambiente interno com fonte de iluminação artificial.

(a) Imagem original (com sombra).



(b) Imagem ideal (sem sombra).

(c) Máscara de sombra.



Fonte: O autor (2018).

Tabela 3 – *Data set 1*: Tabela de avaliação de detecção de sombra.

Image 1	Otsu	Kmeans	Gong
η_s	0.0000	0.7057	0.9828
η_n	1.0000	0.9392	0.5427
ps	NaN	0.7992	0.4241
pn	0.7448	0.9030	0.9892
τ	0.7448	0.8796	0.6550

Figura 23 – *Data set 1*: Avaliação de detecção do método de Otsu.



(a) Imagem com sombra removida pelo método de Otsu



(b) Sobreposição da máscara de sombras original com a máscara de sombras detectada pelo método de Otsu. Em verde está a máscara de sombra original, O método de Otsu não detectou sombras na imagem gerando uma máscara de sombras nula.

Fonte: O autor (2018).

Figura 24 – *Data set 1*: Avaliação de detecção do método de K-means.

(a) Imagem com sombra removida pelo método de K-means



(b) Sobreposição da máscara de sombras original com a máscara de sombras detectada pelo método de K-means. Em verde está a máscara de sombra original, em magenta a máscara de sombras detectada pelo método, a sobreposição das sombras gera a cor preta e a cor branca significa a sobreposição da parte iluminada da imagem.

Fonte: O autor (2018).

Figura 25 – *Data set 1*: Avaliação de detecção do método de Gong.

(a) Imagem com sombra removida pelo método de Gong.



(b) Sobreposição da máscara de sombras original com a máscara de sombras detectada pelo método de Gong. Em verde está a máscara de sombra original, em magenta a máscara de sombras detectada pelo método, a sobreposição das sombras gera a cor preta e a cor branca significa a sobreposição da parte iluminada da imagem.

Fonte: O autor (2018).

4.4.1.2 Avaliação de re-iluminação de áreas sombreadas

Seguindo a metodologia descrita no capítulo 3.6 segmentamos a imagem em duas imagens, a imagem com regiões iluminada e com regiões de sombra. Da imagem original segmentamos a região de sombra com a máscara de sombra original, Figura 26a. Da imagem ideal recortamos regiões de sombra utilizando a máscara de sombras original, Figura 26b. O mapa de similaridade entre as imagens ideal e original na região de sombra é apresentado na Figura 26c, definindo o valor de referência.

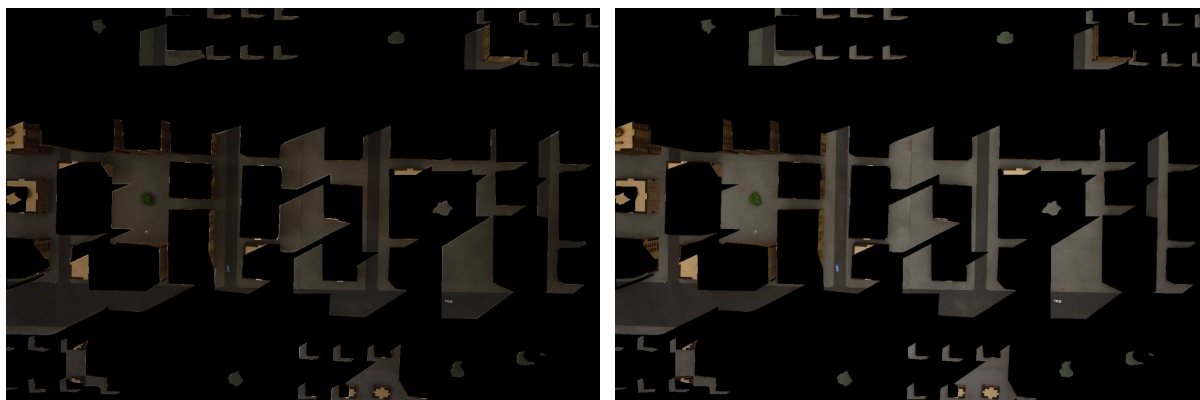
A avaliação do método de Otsu encontra-se na Figura 27 e não apresenta modificação na imagem. O método de K-means na Figura 28 apresenta regiões re-iluminadas nas áreas detectadas com cores semelhantes às dos prédios. O método de Gong na Figura 29 apresenta o aumento de similaridade da região de sombra em 1,28% e visualmente é perceptível a re-iluminação. A Tabela 16 compara os métodos com o valor de referência.

Tabela 4 – *Data set 1*: Índice de similaridade entre as regiões de sombra

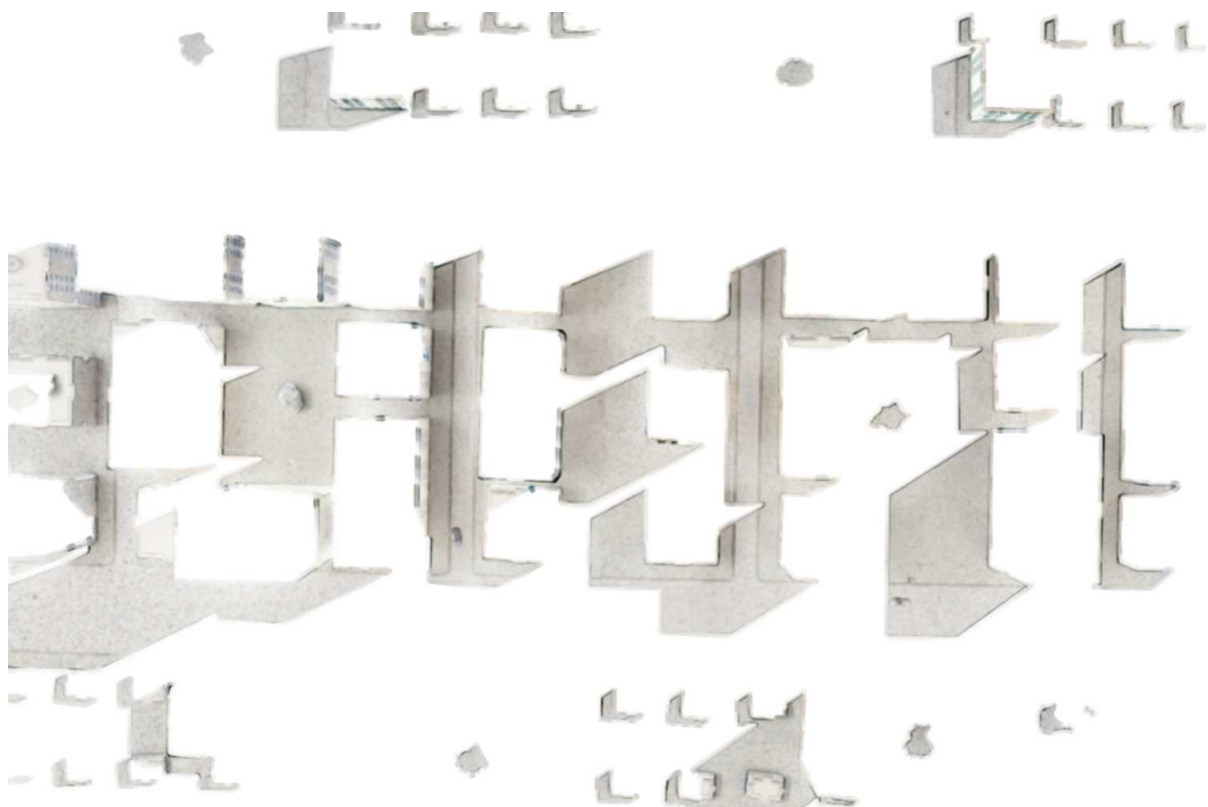
	Original	Otsu	K-means	Gong
SSIM	94,35%	94,35%	94,18%	93,07%
Modificação	–	0%	0,17%	1,28%

Figura 26 – *Data set 1*: Referência para a avaliação de re-iluminação da região de sombras.

- (a) Segmentação da região com sombra da imagem com sombra . (b) Segmentação da região com sombra da imagem ideal.



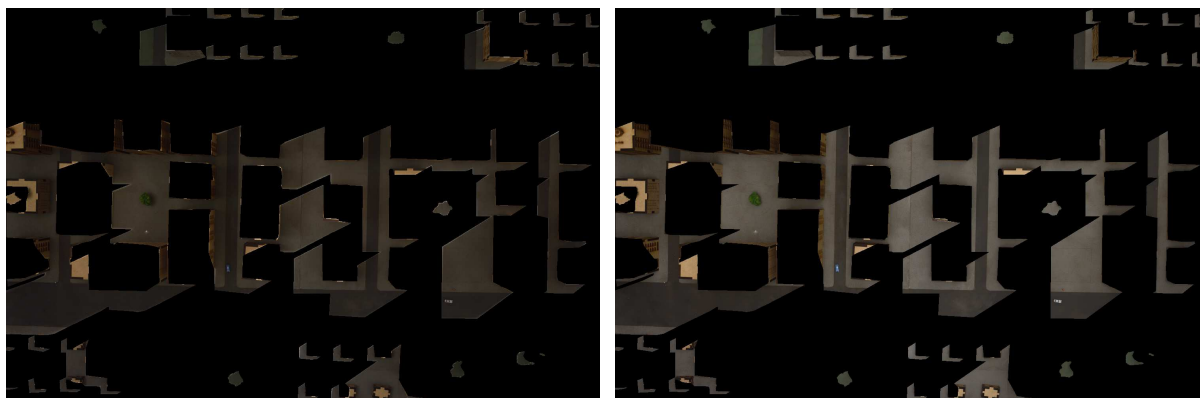
- (c) Mapa de similaridade da região de sombra entre a imagem com sombra e a imagem ideal. O valor de similaridade é 94,43% e será a base para avaliar a re-iluminação dos métodos.



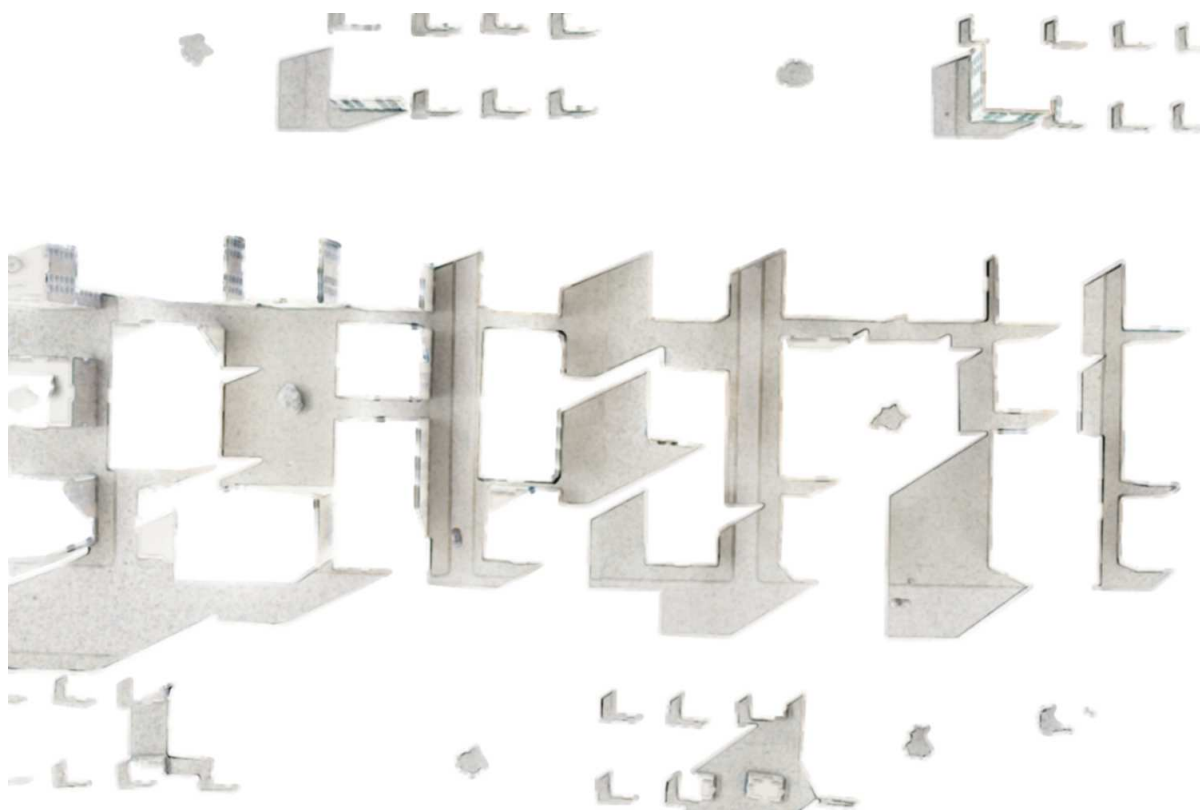
Fonte: O autor (2018).

Figura 27 – *Data set 1*: Avaliação de re-iluminação da região de sombras do método de Otsu.

- (a) Segmentação da região com sombra da imagem modificada pelo método de Otsu. (b) Segmentação da região com sombra da imagem ideal.



- (c) Mapa de similaridade da região de sombra entre a imagem com sombra removida pelo método de Otsu e a imagem ideal. O valor de similaridade é 94,43%, comparando com o valor de referência mostra que o método de Otsu não modificou em nada a imagem.



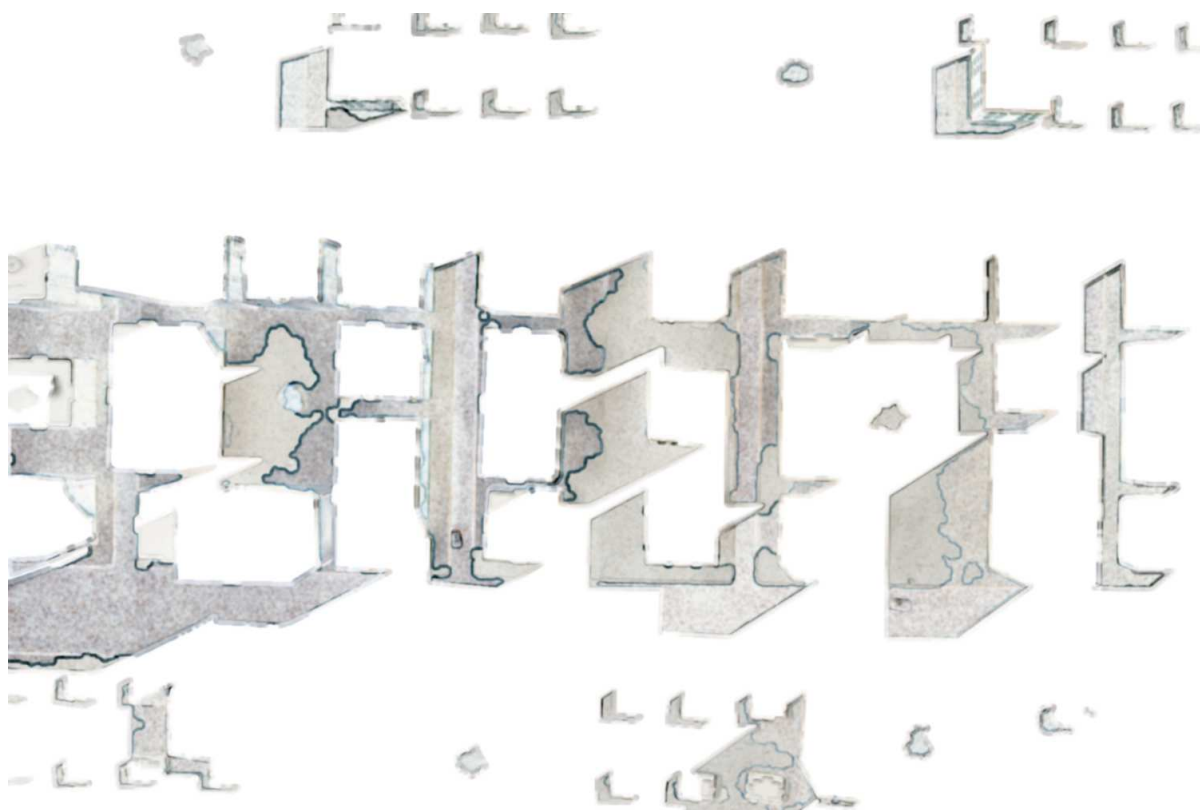
Fonte: O autor (2018).

Figura 28 – *Data set 1*: Avaliação de re-iluminação da região de sombras do método de K-means.

- (a) Segmentação da região com sombra da imagem modificada pelo método de K-means. (b) Segmentação da região com sombra da imagem ideal.



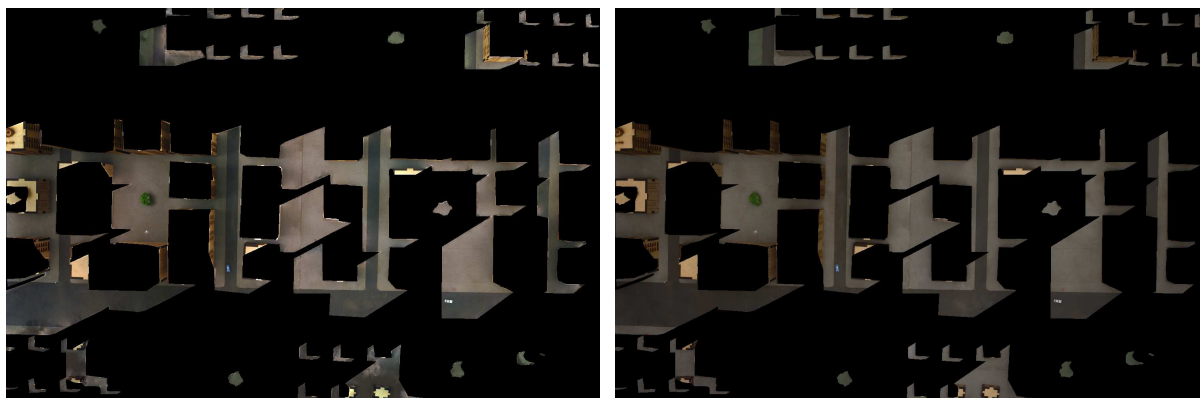
- (c) Mapa de similaridade da região de sombra entre a imagem com sombra removida pelo método de K-means e a imagem ideal. O valor de similaridade é 94,18%, comparando com o valor de referência mostra que o método de K-means modificou a imagem em 0,17%.



Fonte: O autor (2018).

Figura 29 – *Data set 1*: Avaliação de re-iluminação da região de sombras do método de Gong.

- (a) Segmentação da região com sombra da imagem modificada pelo método de Gong.
- (b) Segmentação da região com sombra da imagem ideal.



- (c) Mapa de similaridade da região de sombra entre a imagem com sombra removida pelo método de Gong e a imagem ideal. O valor de similaridade é 93,07%, comparando com o valor de referência mostra que o método de Gong modificou a imagem em 1,28%.



Fonte: O autor (2018).

4.4.1.2.1 Avaliação de re-iluminação de áreas iluminada

Os métodos de remoção de sombra, como visto na avaliação de detecção de sombras, algumas vezes consideram regiões iluminadas da imagem como sombra. A detecção e posterior re-iluminação da área iluminada da imagem conta como fator negativo na avaliação do algoritmo. Avaliar quanto da região iluminada da imagem foi re-iluminada é feito comparando o índice de similaridade entre a região iluminada da imagem original e a região iluminada das imagens processadas pelos métodos. A Tabela 5 apresenta a similaridade estrutural da região iluminada da imagem original com as imagens processadas pelos métodos avaliados. A avaliação do método de Otsu está na Figura 30. A avaliação do método de K-means está na Figura 31 e apresenta rua do lado esquerdo como uma detecção errada de sombra a qual foi re-iluminada, visualmente não é perceptível a alteração da imagem. A avaliação do método de Gong está na Figura 32 e apresenta a re-iluminação errada dos prédios, com alta suturação da imagem.

Tabela 5 – *Data set 1*: Avaliação da re-iluminação da região iluminada da imagem pelo método de similaridade estrutural

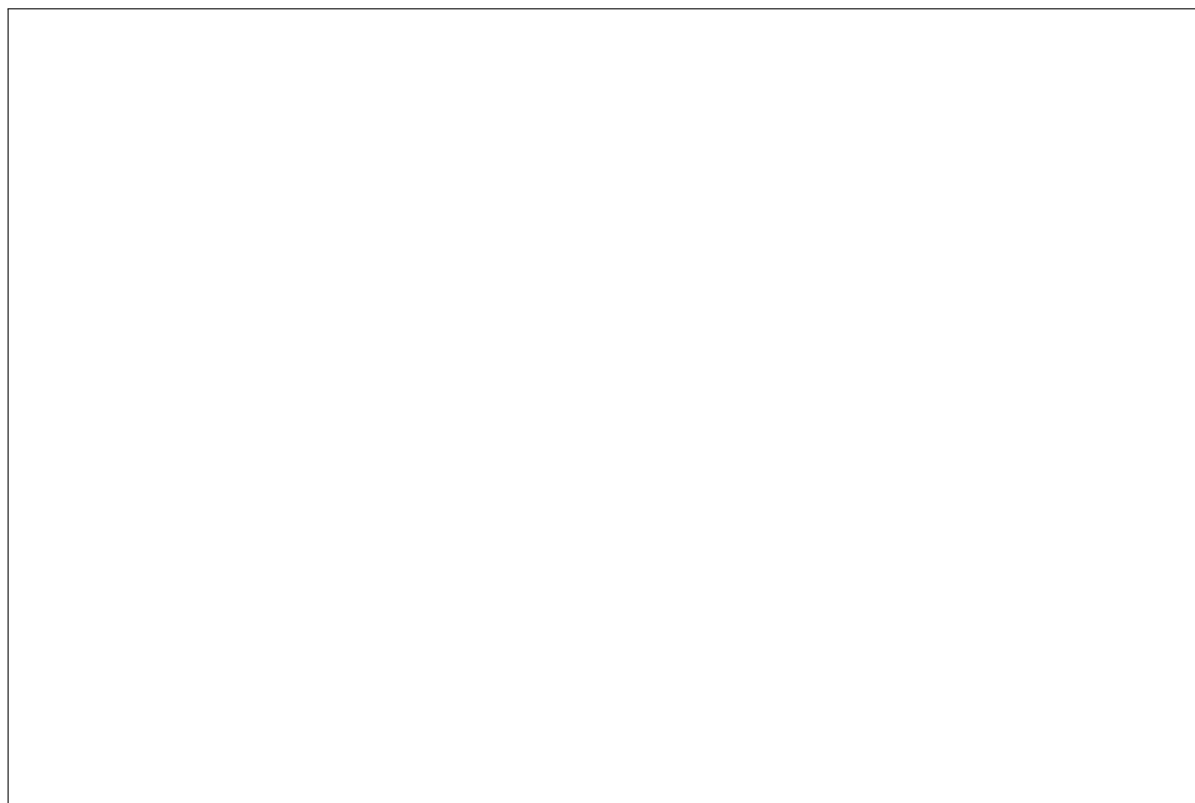
	Otsu	K-means	Gong
SSIM	100%	99,35%	85,29%

Figura 30 – *Data set 1*: Avaliação da re-iluminação da região iluminada processada pelo método de Otsu.

- (a) Segmentação da área iluminada da imagem processada pelo método de Otsu. (b) Segmentação da área iluminada da imagem original.



- (c) Mapa de similaridade estrutural, evidenciando regiões modificadas da imagem pelo método de Otsu.



Fonte: O autor (2018).

Figura 31 – *Data set 1*: Avaliação da re-iluminação da região iluminada processada pelo método de K-means

- (a) Segmentação da área iluminada da imagem processada pelo método de K-means. (b) Segmentação da área iluminada da imagem original.



- (c) Mapa de similaridade estrutural, evidenciando regiões modificadas da imagem pelo método de K-means.



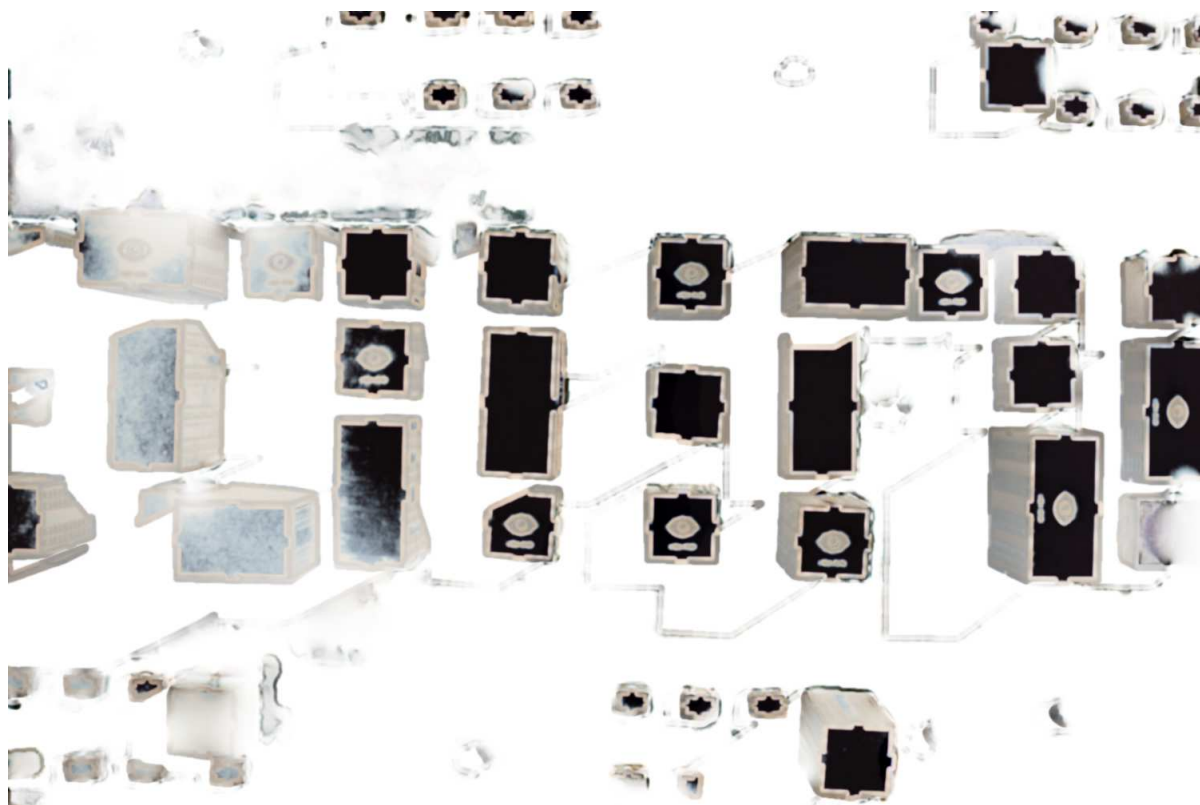
Fonte: O autor (2018).

Figura 32 – *Data set 1*: Avaliação da re-iluminação da região iluminada processada pelo método de Gong.

- (a) Segmentação da área iluminada da imagem processada pelo método de Gong. (b) Segmentação da área iluminada da imagem original.



- (c) Mapa de similaridade estrutural, evidenciando regiões modificadas da imagem pelo método de Gong.



Fonte: O autor (2018).

4.4.1.3 *Data set 1*: Discussão

O *data set 1* gerado com luz artificial de uma fonte de iluminação halógena com IRC de 100% e temperatura de cor de 3000K, equivalente à iluminação de início de manhã ou final de tarde onde a cor da luz tem um toque avermelhado. A componente de iluminação na região de sombra foi gerada pela reflexão da luz direta nas paredes do ambiente.

O método de Otsu não conseguiu reconhecer as sombras. A sensibilidade do método em distinguir entre sombra e região iluminada foi afetada pela falta do efeito Rayleigh nesta cena.

O método de K-means detectou 70% da região de sombra da imagem corretamente. Contudo, o lado esquerdo da imagem mostra uma detecção de sombra em uma área iluminada, evidenciando um erro considerável neste lado da imagem. A re-iluminação do método mostrou a borda da sombra detectada uma re-iluminação maior que no centro da sombra. Pode-se notar também a diferença entre a re-iluminação do lado esquerdo foi maior que do lado direito.

O método de GONG detectou 98,28% da sombra da imagem corretamente, porém exagerou no erro de detectar regiões iluminadas como sombra. Ao avaliar somente a Figura 29a nota-se um ganho considerável na re-iluminação porém, a região iluminada da imagem foi comprometida, saturando a imagem.

4.4.2 Data set 2

O *data set 2* foi adquirido em ambiente interno, com iluminação artificial. Na Figura 33a uma lâmpada halogena de 500W foi utilizada como fonte de luz direta para criar a sombra e uma lâmpada fluorescente de 15W com temperatura de cor de 6500K na direção contrária à sombra para emular o efeito de Rayleigh. Na Figura 33b foi utilizada uma lâmpada Halogena de 1000W, direcionada para o teto do laboratório, criando a cena sem sombra. A máscara de sombra foi criada pela diferença entra a imagem original com sombra e a imagem ideal sem sombra, também foi feito um pós-processamento na imagem de modo a deixar somente as sombras demarcadas, Figura 33c.

Figura 33 – *Data set 2*: Imagens adquiridas em ambiente interno com fonte de iluminação artificial.



Fonte: O autor (2018).

4.4.2.1 Avaliação de detecção de Sombra

O método de avaliar a detecção de sombra na imagem, definido no capítulo 3.5, é aplicado para cada algoritmo avaliado, obtendo uma representação quantitativa pela Tabela 6. A representação qualitativa da detecção de sombra apresenta-se na forma de imagem, onde a máscara original, sobreposta máscara de detecção do algoritmo avaliado são sobrepostas e comparadas.

O resultado do método de Otsu representado na Figura 34, detectou poucas sombras na imagem (36, 16%), porém na detecção de área iluminada o acerto foi de 99, 46%.

O resultado do método de K-means representado na Figura 35 apresenta uma detecção de 90, 68% na região de sombra e 93, 51% na região iluminada.

O resultado do método de Gong representado na Figura 36 apresenta uma alta detecção de sombra (98, 56%) porém erra ao considerar regiões iluminadas como sombra (78, 24%).

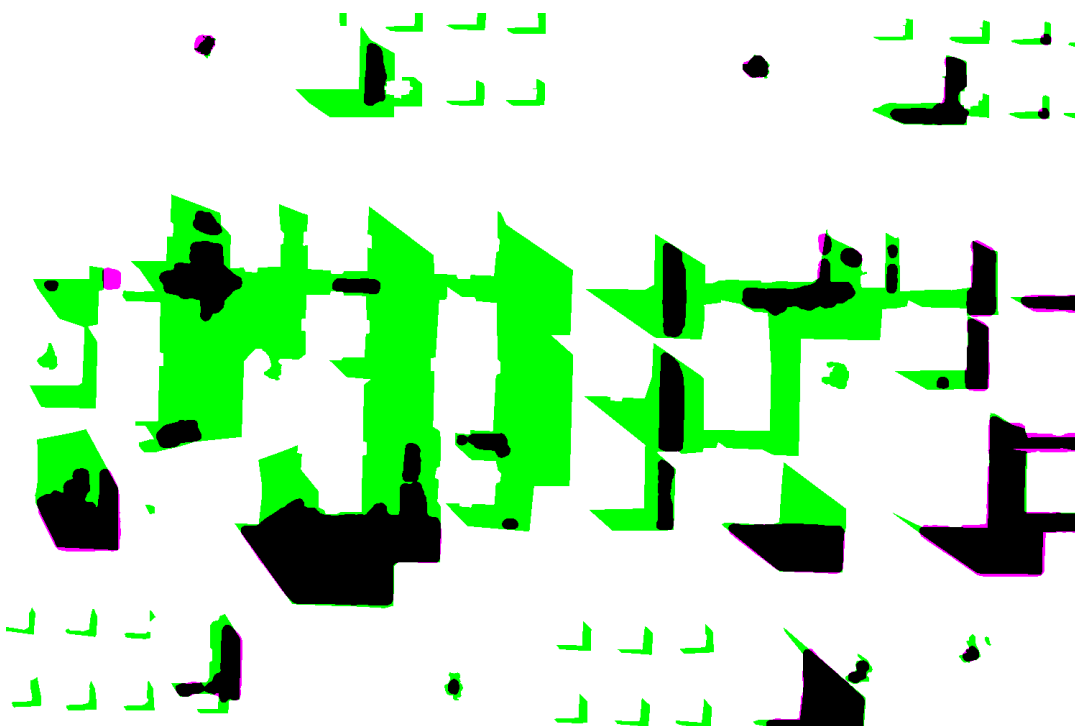
Na avaliação da imagem geral (τ) K-means foi melhor que Gong e o método de Otsu.

Tabela 6 – *Data set 2*: Tabela de avaliação de detecção de sombra.

Image 2	Otsu	Kmeans	Gong
η_s	0.3616	0.9068	0.9856
η_n	0.9946	0.9351	0.7824
p_s	0.9535	0.8096	0.5794
p_n	0.8367	0.9706	0.9944
τ	0.8470	0.9285	0.8298

Figura 34 – *Data set 2*: Avaliação de detecção do método de Otsu.

(a) Imagem com sombra removida pelo método de Otsu

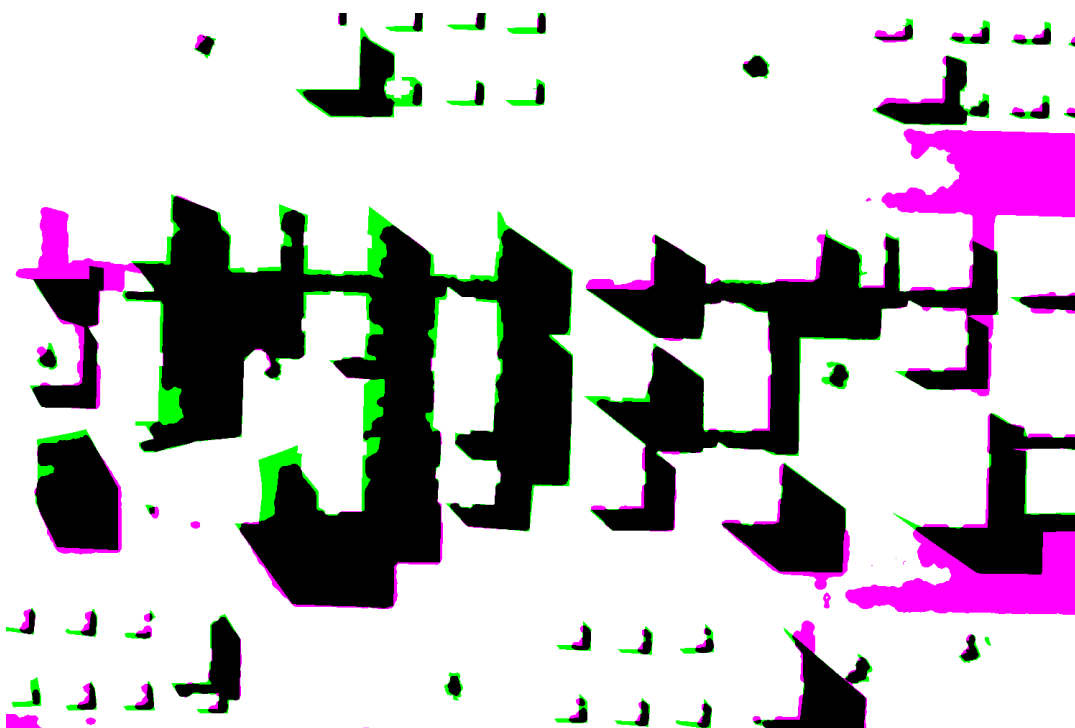


(b) Sobreposição da máscara de sombras original com a máscara de sombras detectada pelo método de Otsu. Em verde está a máscara de sombra original, em magenta a máscara de sombras detectada pelo método, a sobreposição das sombras gera a cor preta e a cor branca significa a sobreposição da parte iluminada da imagem.

Fonte: O autor (2018).

Figura 35 – *Data set 2*: Avaliação de detecção do método de K-means.

(a) Imagem com sombra removida pelo método de K-means



(b) Sobreposição da máscara de sombras original com a máscara de sombras detectada pelo método de K-means. Em verde está a máscara de sombra original, em magenta a máscara de sombras detectada pelo método, a sobreposição das sombras gera a cor preta e a cor branca significa a sobreposição da parte iluminada da imagem.

Fonte: O autor (2018).

Figura 36 – *Data set 2*: Avaliação de detecção do método de Gong.

(a) Imagem com sombra removida pelo método de Gong.



(b) Sobreposição da máscara de sombras original com a máscara de sombras detectada pelo método de Gong. Em verde está a máscara de sombra original, em magenta a máscara de sombras detectada pelo método, a sobreposição das sombras gera a cor preta e a cor branca significa a sobreposição da parte iluminada da imagem.

Fonte: O autor (2018).

4.4.2.2 Avaliação de re-iluminação de áreas sombreadas

Seguindo a metodologia descrita no capítulo 3.6 segmentamos a imagem em duas imagens, a imagem com regiões iluminada e com regiões de sombra. Da imagem original segmentamos a região de sombra com a máscara de sombra original, Figura 37a. Da imagem ideal recortamos regiões de sombra utilizando a máscara de sombras original, Figura 37b. O mapa de similaridade entre as imagens ideal e original na região de sombra na Figura 37c, criando o valor de referência.

A avaliação do método de Otsu encontra-se na Figura 38 e apresenta um valor de re-iluminação de 2,05% não percebido visualmente. O método de K-means na Figura 39 aumenta a similaridade com a imagem sem sombra em 4,37% e é visualmente sutil a re-iluminação. O método de Gong na Figura 40 apresenta um aumento de similaridade em 2,55% porém visualmente é possível notar a saturação da imagem. A Tabela 16 compara os métodos com o valor de referência.

Tabela 7 – *Data set 2*: Índice de similaridade entre as regiões de sombra

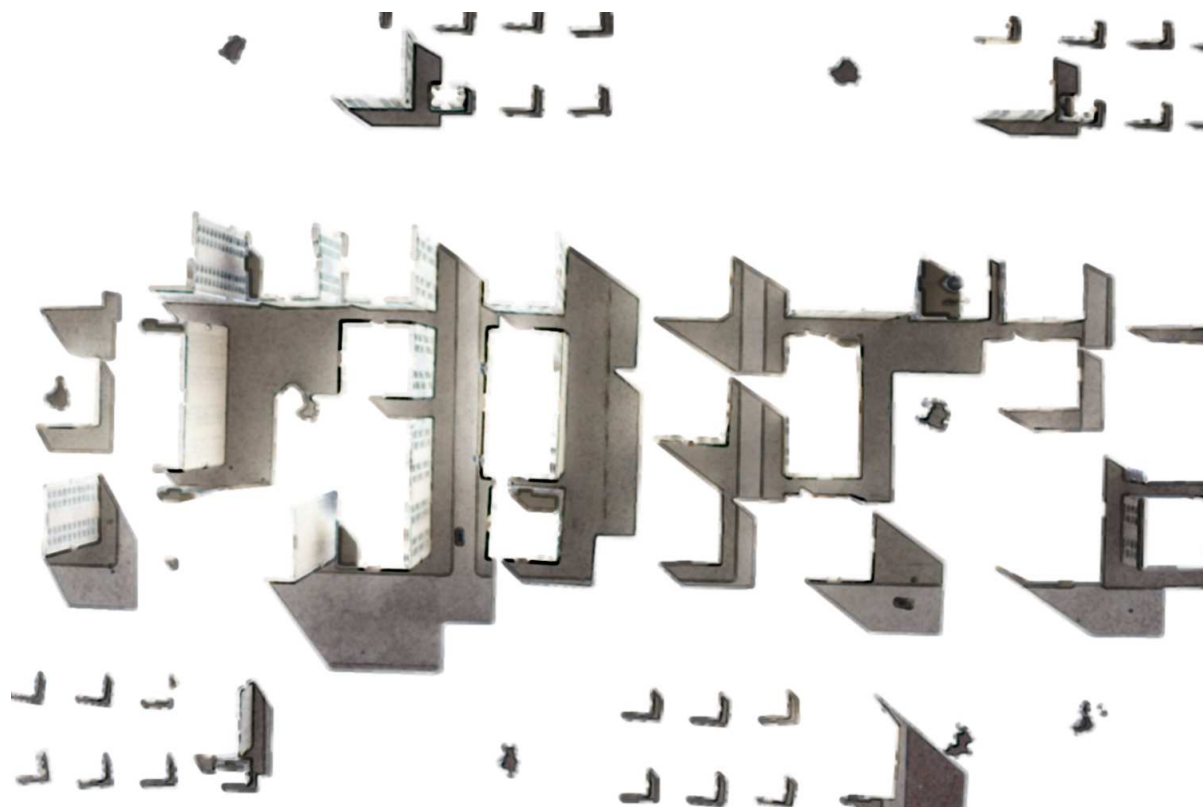
	Original	Otsu	K-means	Gong
SSIM	87,49%	89,54%	91,86%	90,04%
Modificação	–	2,05%	4,37%	2,55%

Figura 37 – *Data set 2*: Referência para a avaliação de re-iluminação da região de sombras.

- (a) Segmentação da região com sombra da imagem com sombra . (b) Segmentação da região com sombra da imagem ideal.



- (c) Mapa de similaridade da região de sombra entre a imagem com sombra e a imagem ideal. O valor de similaridade é 87,49% e será a base para avaliar a re-iluminação dos métodos.



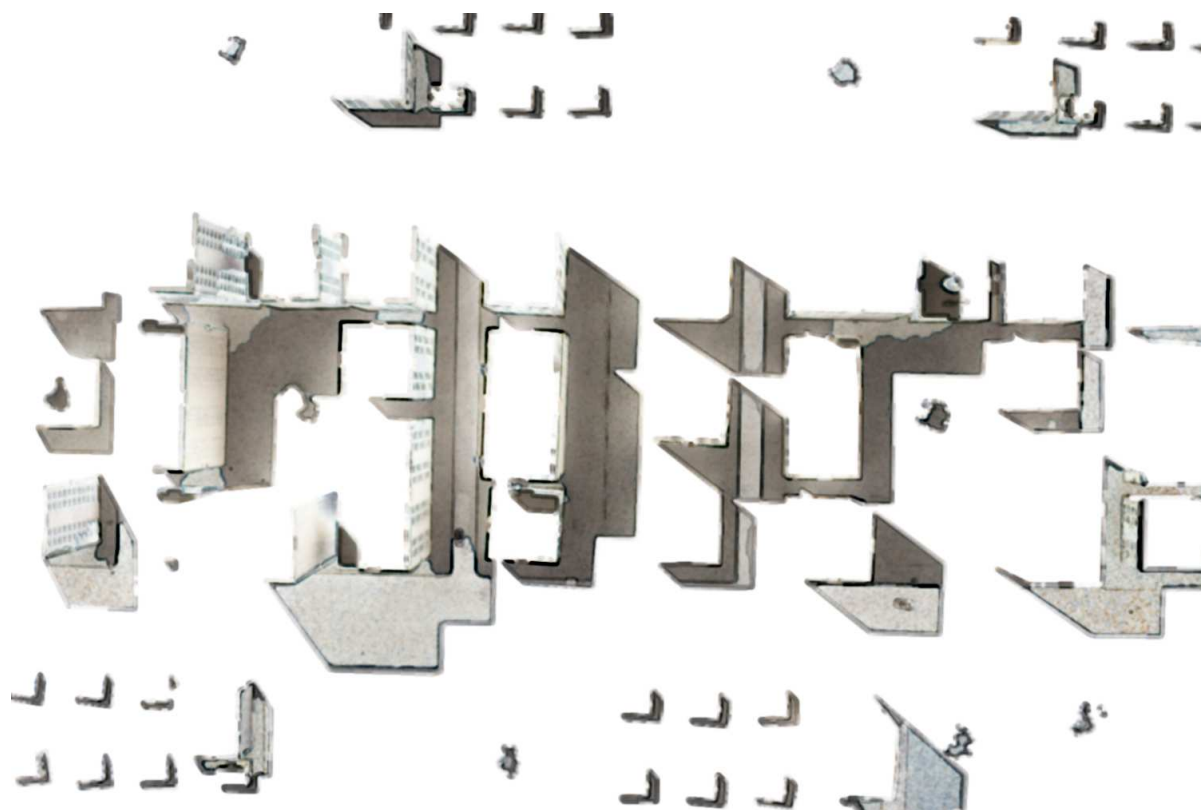
Fonte: O autor (2018).

Figura 38 – *Data set 2*: Avaliação de re-iluminação da região de sombras do método de Otsu.

- (a) Segmentação da região com sombra da imagem modificada pelo método de Otsu. (b) Segmentação da região com sombra da imagem ideal.



- (c) Mapa de similaridade da região de sombra entre a imagem com sombra removida pelo método de Otsu e a imagem ideal. O valor de similaridade é 89,54%, comparando com o valor de referência mostra que o método de Otsu aumentou o índice de similaridade em 2,05%.



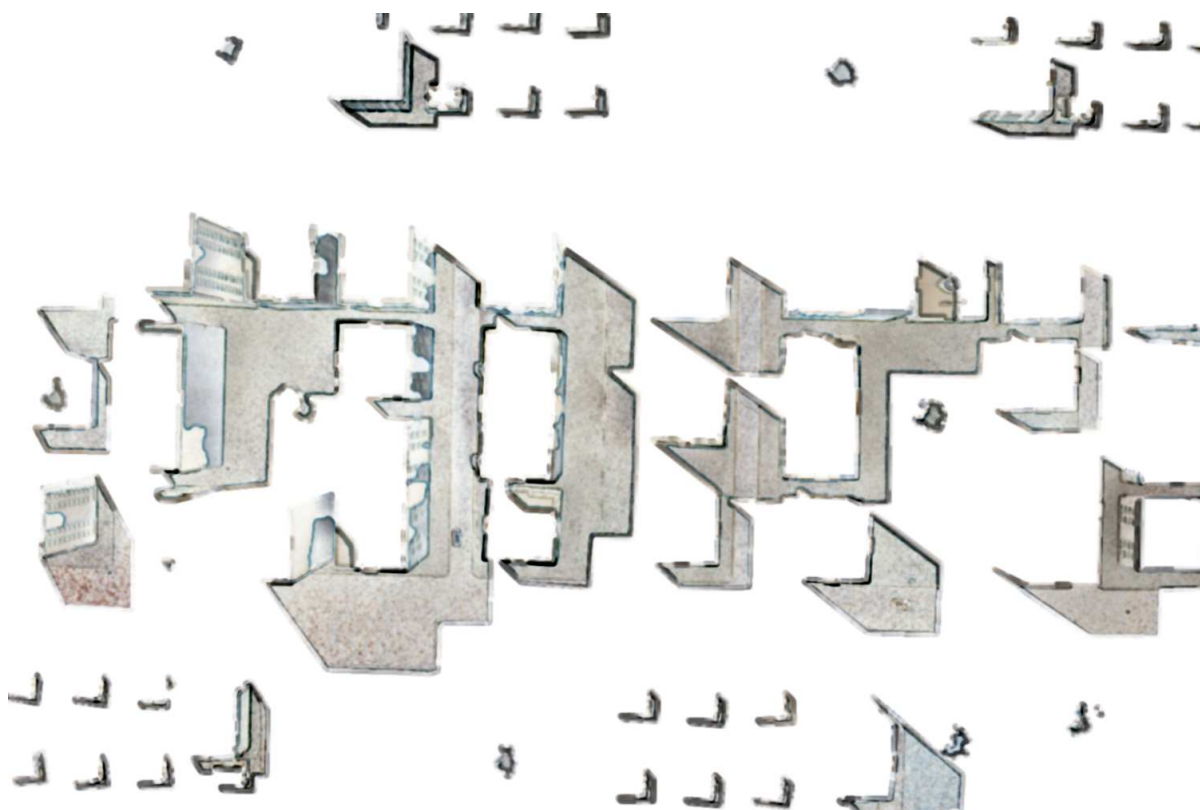
Fonte: O autor (2018).

Figura 39 – *Data set 2*: Avaliação de re-iluminação da região de sombras do método de K-means.

- (a) Segmentação da região com sombra da imagem modificada pelo método de K-means. (b) Segmentação da região com sombra da imagem ideal.



- (c) Mapa de similaridade da região de sombra entre a imagem com sombra removida pelo método de K-means e a imagem ideal. O valor de similaridade é 91,86%, comparando com o valor de referência mostra que o método de K-means modificou a imagem em 4,37%.



Fonte: O autor (2018).

Figura 40 – *Data set 2*: Avaliação de re-iluminação da região de sombras do método de Gong.

- (a) Segmentação da região com sombra da imagem modificada pelo método de Gong. (b) Segmentação da região com sombra da imagem ideal.



- (c) Mapa de similaridade da região de sombra entre a imagem com sombra removida pelo método de Gong e a imagem ideal. O valor de similaridade é 90,04%, comparando com o valor de referência mostra que o método de Gong modificou a imagem em 2,55%.



Fonte: O autor (2018).

4.4.2.2.1 Avaliação de re-iluminação de áreas iluminadas

Os métodos de remoção de sombra, como visto na avaliação de detecção de sombras, algumas vezes consideram regiões iluminadas da imagem como sombra. A detecção e posterior re-iluminação da área iluminada da imagem conta como fator negativo na avaliação do algoritmo. Avaliar quanto da região iluminada da imagem foi re-iluminada é feito comparando o índice de similaridade entre a região iluminada da imagem original e a região iluminada das imagens processadas pelos métodos. A Tabela 8 apresenta a similaridade estrutural da região iluminada da imagem original com as imagens processadas pelos métodos avaliados.

A avaliação do método de Otsu está na Figura 41 e apresenta pontuais re-iluminações que não afetam a imagem e o valor de similaridade de 99,93% corrobora com a sensação visual.

A avaliação do método de K-means está na Figura 42 apresenta do lado direito da imagem regiões de ruas consideradas erroneamente sombras e diminuem o valor de similaridade da imagem em 2,15%.

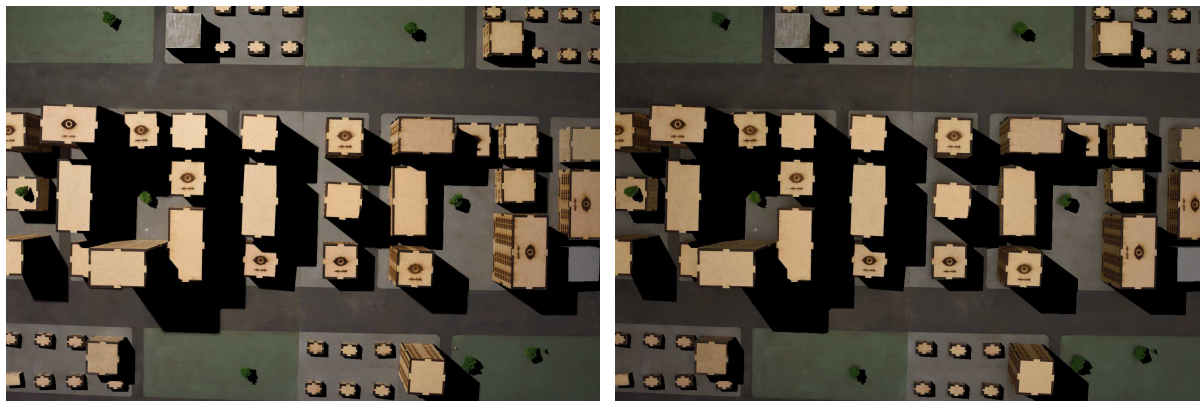
A avaliação do método de Gong está na Figura 43 e apresenta uma diminuição no valor de similaridade de 5,87% com a imagem original e visualmente é notável a saturação do prédio a direita.

Tabela 8 – *Data set 2*: Avaliação da re-iluminação da região iluminada da imagem pelo método de similaridade estrutural

	Otsu	K-means	Gong
SSIM	99,93%	97,85%	94,13%

Figura 41 – *Data set 2*: Avaliação da re-iluminação da região iluminada processada pelo método de Otsu.

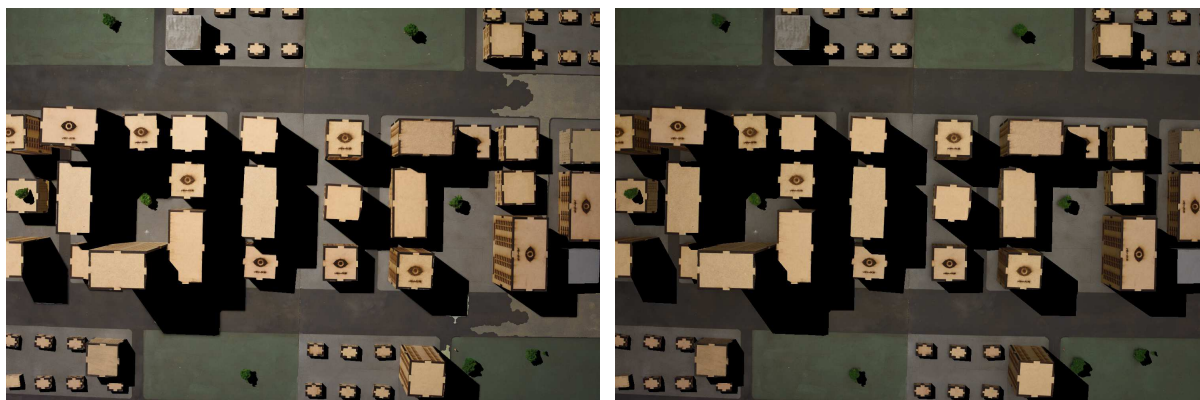
- (a) Segmentação da área iluminada da imagem processada pelo método de Otsu. (b) Segmentação da área iluminada da imagem original.



- (c) Mapa de similaridade estrutural, evidenciando regiões modificadas da imagem pelo método de Otsu.

Figura 42 – *Data set 2*: Avaliação da re-iluminação da região iluminada processada pelo método de K-means

- (a) Segmentação da área iluminada da imagem processada pelo método de K-means. (b) Segmentação da área iluminada da imagem original.



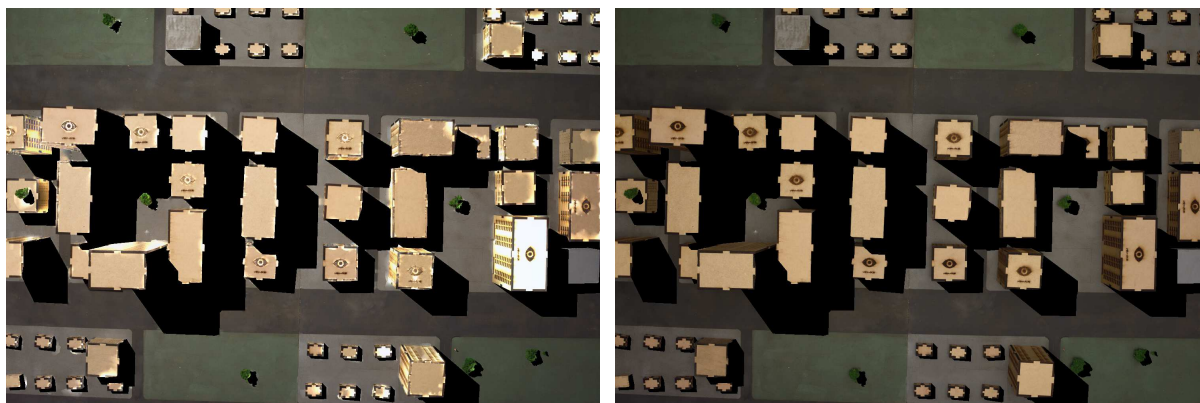
- (c) Mapa de similaridade estrutural, evidenciando regiões modificadas da imagem pelo método de K-means.



Fonte: O autor (2018).

Figura 43 – *Data set 2*: Avaliação da re-iluminação da região iluminada processada pelo método de Gong.

- (a) Segmentação da área iluminada da imagem processada pelo método de Gong. (b) Segmentação da área iluminada da imagem original.



- (c) Mapa de similaridade estrutural, evidenciando regiões modificadas da imagem pelo método de Gong.



Fonte: O autor (2018).

4.4.2.3 Data set 2: Discussão

O *data set 2* foi gerado com luz artificial de uma fonte de iluminação halógena com IRC de 100% e temperatura de cor de 3000K. O *data set 2* difere do *data set 1* na iluminação da sombra, onde foi utilizada uma lâmpada fluorescente com temperatura de cor de 6500K para emular o efeito atmosférico.

O método de Otsu para esta imagem reconheceu 36,16% da sombra. Apesar de não ser um bom resultado, se comparado com o *data set 1* evidencia a melhora da detecção devido a iluminação da sombra. A melhor região de detecção foi a região da imagem oposta da fonte de luz direta, região melhor iluminada pela lâmpada fria. A re-iluminação melhorou na região onde foi detectada a sombra, na Figura 34a podemos notar melhor os veículos que estavam na sombra.

O método de K-means detectou 90,68% da sombra, é possível notar que o método não detectou sombras na região central da imagem e considerou sombras regiões iluminadas das bordas da imagem. Na parte de re-iluminação é importante ressaltar as bordas da região detectada como sombra estão escurecidas, é possível ver a borda escura tanto na região de sombra (Figura 39c) quanto na região iluminada (Figura 42c)

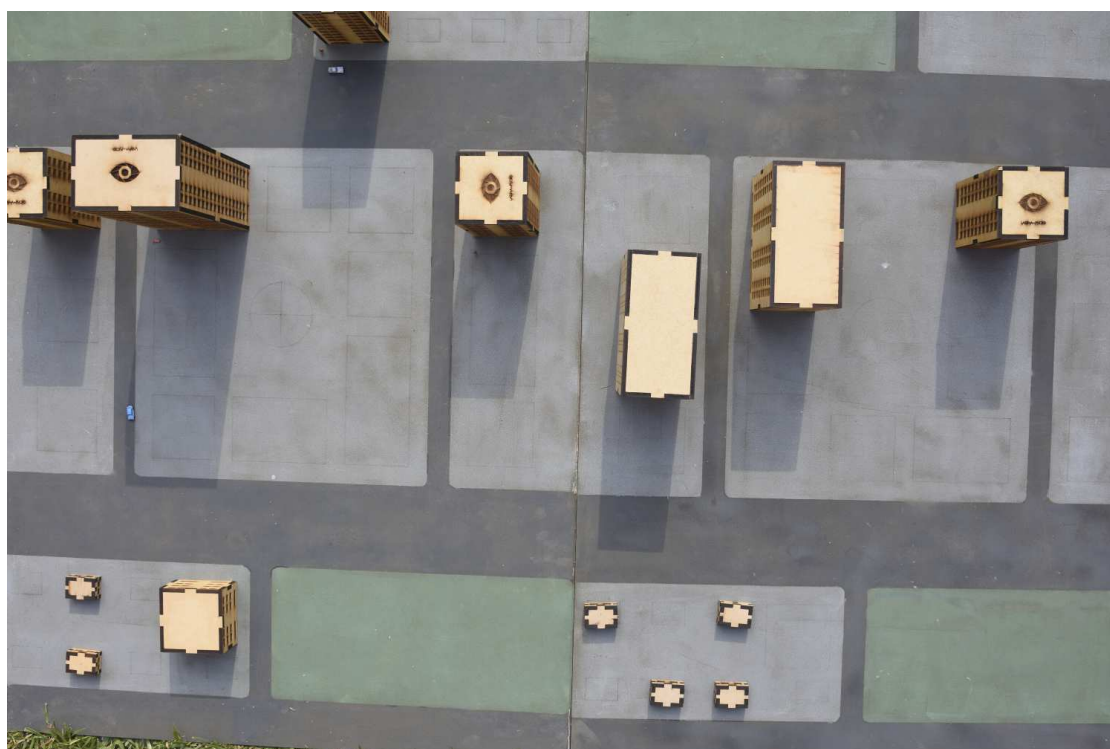
O método de Gong detectou 98,56% da região de sombra, interessante notar que a maior região de sombra não detectada foi de uma *self-shadow* de um prédio, a detecção de sombra em regiões iluminadas que foi o ponto fraco do método 78,24%. A re-iluminação da imagem a avaliação quantitativa usando SSIM denota uma melhoria de 2,55% na região com sombra da imagem e se compararmos com os outros métodos que detectaram menos regiões de sombras e obtiveram resultados na re-iluminação semelhante. É possível notar que o método de Gong ao re-iluminar a imagem iluminou demasiadamente saturando a imagem.

4.4.3 Data set 3

O *data set 3* foi adquirido em ambiente externo, com iluminação natural. Na Figura 44a o sol foi utilizado como fonte de luz direta para criar a sombra. Na Figura 44b uma nuvem sobreposta ao sol foi utilizada para difusão dos raios solares, criando a cena sem sombra. A máscara de sombra foi criada pela diferença entra a imagem original com sombra e a imagem ideal sem sombra, também foi feito um pós-processamento na imagem de modo a deixar somente as sombras demarcadas, Figura 44c.

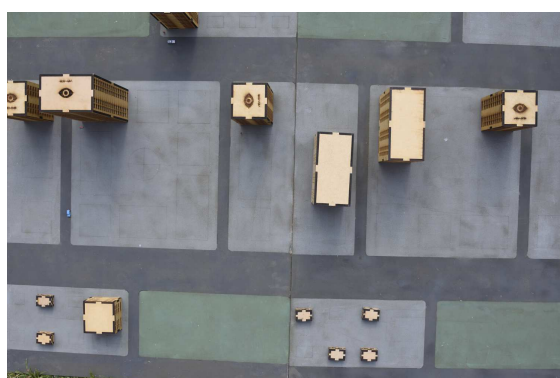
Figura 44 – *Data set 3*: Imagens adquiridas em ambiente Externo com fonte de iluminação natural.

(a) Imagem original (com sombra).



(b) Imagem ideal (sem sombra).

(c) Máscara de sombra.



Fonte: O autor (2018).

4.4.3.1 Avaliação de detecção de Sombra

O método de avaliar a detecção de sombra na imagem, definido no capítulo 3.5, é aplicado para cada algoritmo avaliado, obtendo uma representação quantitativa pela Tabela 9. A representação qualitativa da detecção de sombra apresenta-se na forma de imagem, onde a máscara original, sobreposta máscara de detecção do algoritmo avaliado são sobrepostas e comparadas.

O resultado do método de Otsu representado na Figura 45, detecta corretamente 79,18% das regiões de sombra e 74,08% das regiões iluminadas da imagem.

O resultado do método de K-means representado na Figura 46 apresenta uma detecção de 71,74% na região de sombra e 95,4% na região iluminada.

O resultado do método de Gong representado na Figura 47 apresenta uma alta detecção de sombra (94,02%) e detecta regiões iluminadas como sombra em (88,58%) dos casos.

Na avaliação da imagem geral (τ) K-means foi melhor que Gong e o método de Otsu ficou em ultimo lugar.

Tabela 9 – *Data set 3*: Tabela de avaliação de detecção de sombra.

Image 3	Otsu	Kmeans	Gong
η_s	0.6267	0.3006	0.9042
η_n	0.6661	0.9718	0.8244
p_s	0.2369	0.6383	0.4599
p_n	0.9152	0.8936	0.9811
τ	0.6605	0.8766	0.8357

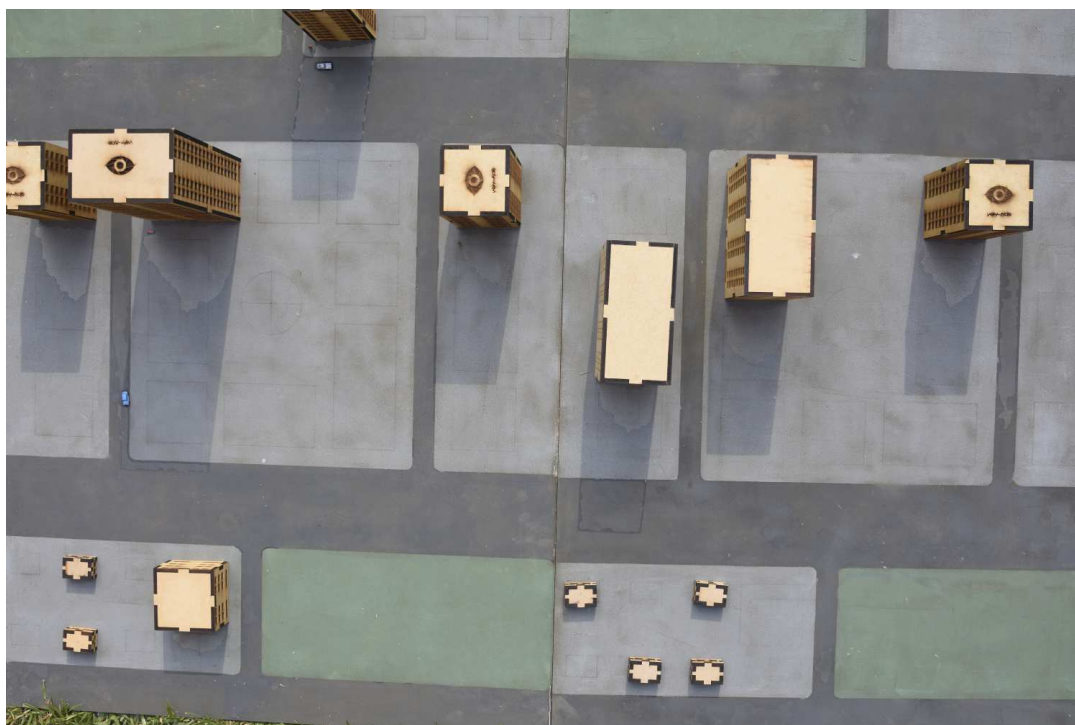
Figura 45 – *Data set 3*: Avaliação de detecção do método de Otsu.

(a) Imagem com sombra removida pelo método de Otsu

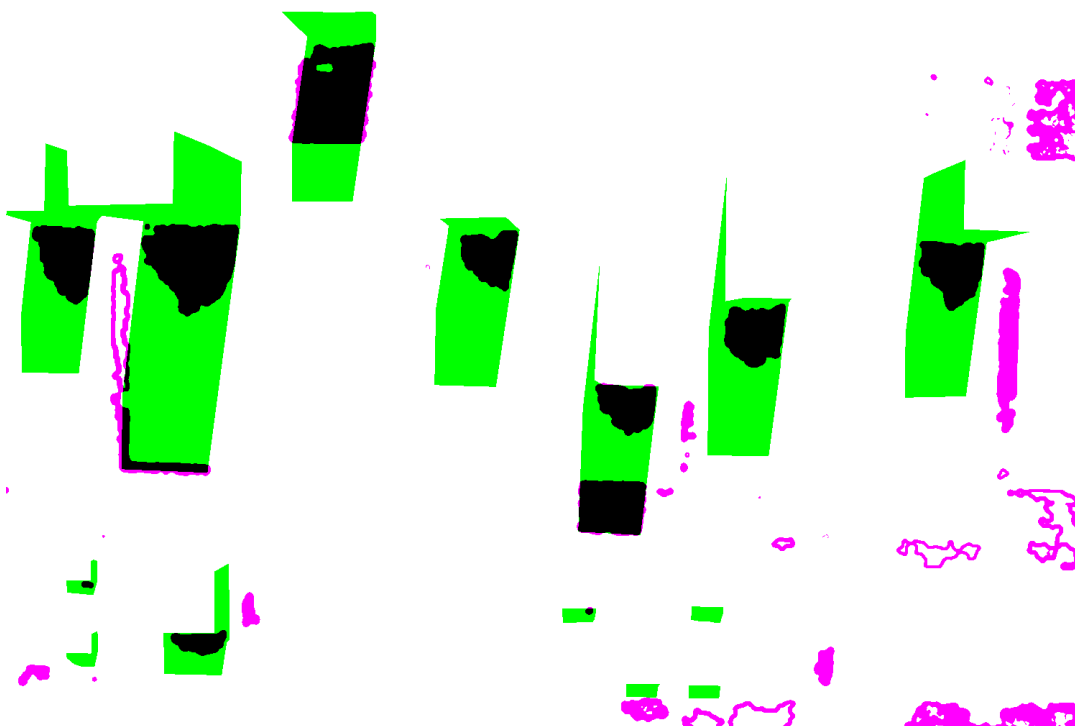


(b) Sobreposição da máscara de sombras original com a máscara de sombras detectada pelo método de Otsu. Em verde está a máscara de sombra original, em magenta a máscara de sombras detectada pelo método, a sobreposição das sombras gera a cor preta e a cor branca significa a sobreposição da parte iluminada da imagem.

Fonte: O autor (2018).

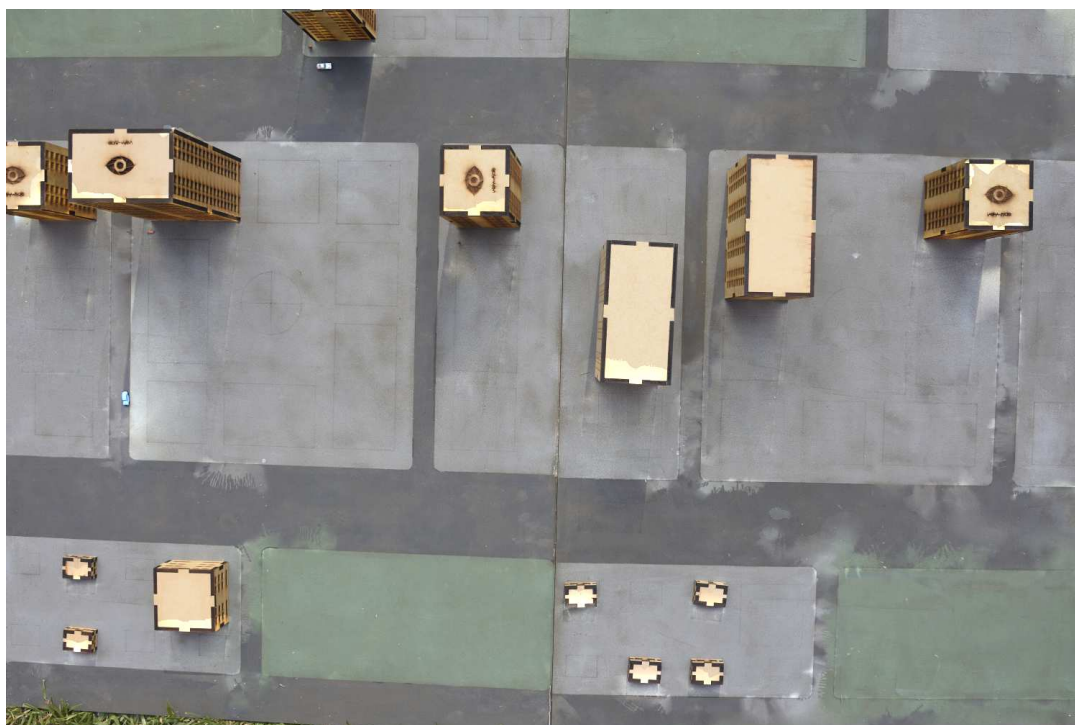
Figura 46 – *Data set 3*: Avaliação de detecção do método de K-means.

(a) Imagem com sombra removida pelo método de K-means

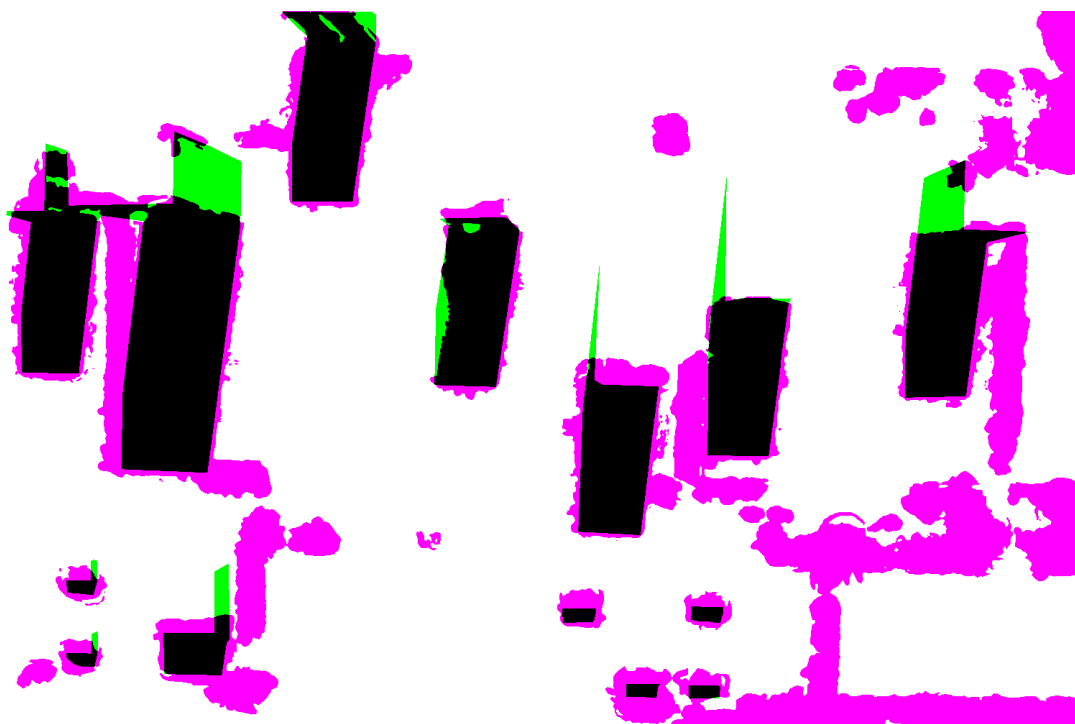


(b) Sobreposição da máscara de sombras original com a máscara de sombras detectada pelo método de K-means. Em verde está a máscara de sombra original, em magenta a máscara de sombras detectada pelo método, a sobreposição das sombras gera a cor preta e a cor branca significa a sobreposição da parte iluminada da imagem.

Fonte: O autor (2018).

Figura 47 – *Data set 3*: Avaliação de detecção do método de Gong.

(a) Imagem com sombra removida pelo método de Gong.



(b) Sobreposição da máscara de sombras original com a máscara de sombras detectada pelo método de Gong. Em verde está a máscara de sombra original, em magenta a máscara de sombras detectada pelo método, a sobreposição das sombras gera a cor preta e a cor branca significa a sobreposição da parte iluminada da imagem.

Fonte: O autor (2018).

4.4.3.2 Avaliação de re-iluminação de áreas sombreadas

Seguindo a metodologia descrita no capítulo 3.6 segmentamos a imagem em duas imagens, a imagem com regiões iluminada e com regiões de sombra. Da imagem original segmentamos a região de sombra com a máscara de sombra original, Figura 48b. Da imagem ideal recortamos regiões de sombra utilizando a máscara de sombras original, Figura 48a. O mapa de similaridade entre as imagens ideal e original na região de sombra na Figura 48c, criando o valor de referência.

A avaliação do método de Otsu encontra-se na Figura 49, do método de K-means na Figura 50 e do método de Gong na Figura 51. Os valores de re-iluminação apresentam uma diminuição no valor de similaridade devido a imagem ideal ser adquirida no momento que o sol é bloqueado por uma nuvem. A Tabela 16 compara os métodos com o valor de referência.

Tabela 10 – *Data set 3*: Índice de similaridade entre as regiões de sombra

	Original	Otsu	K-means	Gong
SSIM	98,78%	97,58%	98,39%	96,31%
Modificação	–	-1,20%	-0,39%	-2,47%

Figura 48 – *Data set 3*: Referência para a avaliação de re-iluminação da região de sombras.

- (a) Segmentação da região com sombra da imagem com sombra . (b) Segmentação da região com sombra da imagem ideal.



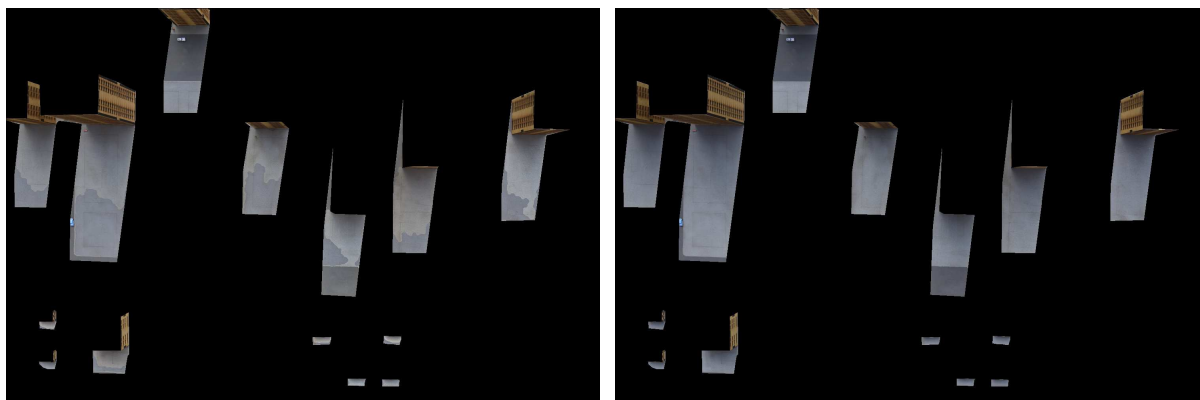
- (c) Mapa de similaridade da região de sombra entre a imagem com sombra e a imagem ideal. O valor de similaridade é 98,78% e será a base para avaliar a re-iluminação dos métodos.



Fonte: O autor (2018).

Figura 49 – *Data set 3*: Avaliação de re-iluminação da região de sombras do método de Otsu.

- (a) Segmentação da região com sombra da imagem modificada pelo método de Otsu. (b) Segmentação da região com sombra da imagem ideal.



- (c) Mapa de similaridade da região de sombra entre a imagem com sombra removida pelo método de Otsu e a imagem ideal. O valor de similaridade é 97,58%, distanciando o índice de similaridade em -1,20% da imagem ideal.



Fonte: O autor (2018).

Figura 50 – *Data set 3*: Avaliação de re-iluminação da região de sombras do método de K-means.

- (a) Segmentação da região com sombra da imagem modificada pelo método de K-means. (b) Segmentação da região com sombra da imagem ideal.



- (c) Mapa de similaridade da região de sombra entre a imagem com sombra removida pelo método de K-means e a imagem ideal. O valor de similaridade é 98,39%, distanciando o índice de similaridade em -0,39% da imagem ideal..



Fonte: O autor (2018).

Figura 51 – *Data set 3*: Avaliação de re-iluminação da região de sombras do método de Gong.

- (a) Segmentação da região com sombra da imagem modificada pelo método de Gong. (b) Segmentação da região com sombra da imagem ideal.



- (c) Mapa de similaridade da região de sombra entre a imagem com sombra removida pelo método de Gong e a imagem ideal. O valor de similaridade é 96,31%, distanciando o índice de similaridade em $-2,47\%$ da imagem ideal.



Fonte: O autor (2018).

4.4.3.3 Avaliação de re-iluminação de áreas iluminada

Os métodos de remoção de sombra, como visto na avaliação de detecção de sombras, algumas vezes consideram regiões iluminadas da imagem como sombra. A detecção e posterior re-iluminação da área iluminada da imagem conta como fator negativo na avaliação do algoritmo. Avaliar quanto da região iluminada da imagem foi re-iluminada é feito comparando o índice de similaridade entre a região iluminada da imagem original e a região iluminada das imagens processadas pelos métodos. A Tabela 11 apresenta a similaridade estrutural da região iluminada da imagem original com as imagens processadas pelos métodos avaliados.

A avaliação do método de Otsu está na Figura 52, apresenta uma sutil modificação na região iluminada da imagem, apesar da detecção considerar erroneamente regiões de rua iluminada como sombra.

A avaliação do método de K-means está na Figura 53 apresenta um alto índice de similaridade (99,85%) com a imagem original e não é possível notar diferença visual.

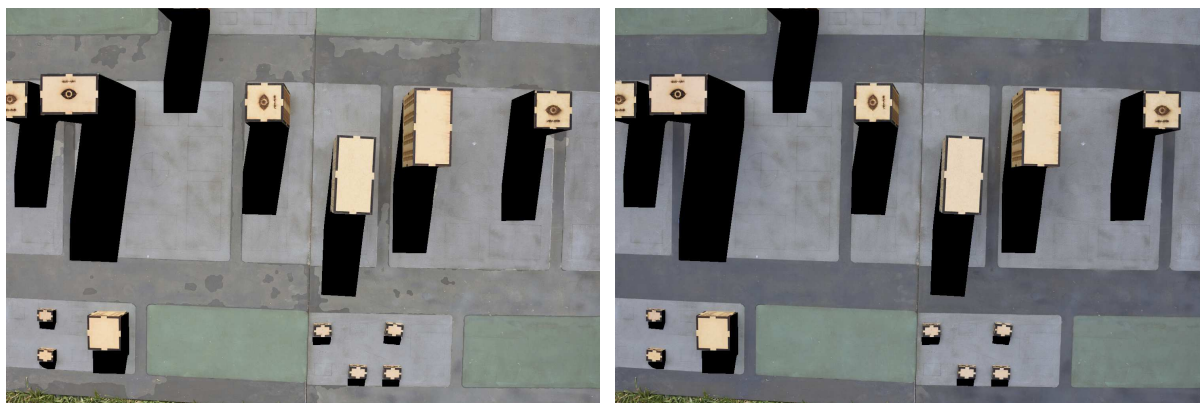
A avaliação do método de Gong está na Figura 54 apresenta um alto valor de similaridade com a imagem original, porém visualmente é possível notar uma grande modificação da imagem

Tabela 11 – *Data set 3*: Avaliação da re-iluminação da região iluminada da imagem pelo método de similaridade estrutural

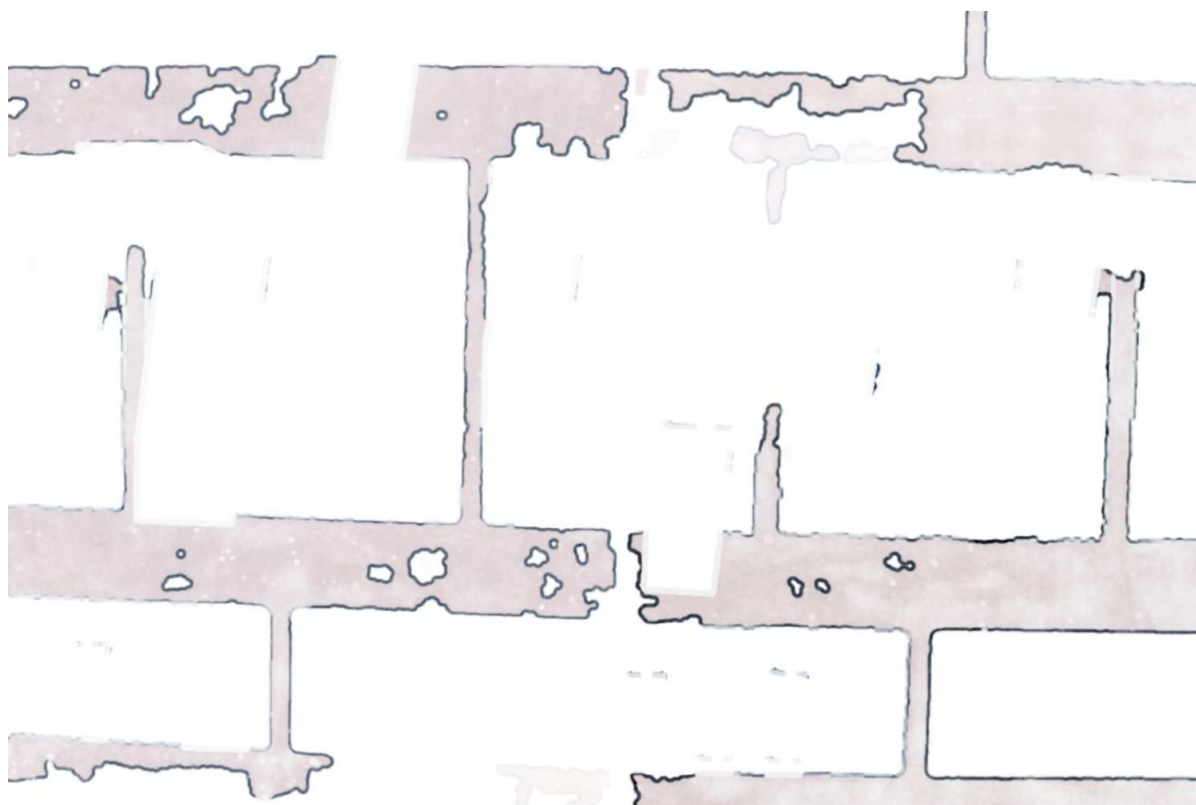
	Otsu	K-means	Gong
SSIM	95,82%	99,85%	97,51%

Figura 52 – *Data set 3*: Avaliação da re-iluminação da região iluminada processada pelo método de Otsu.

- (a) Segmentação da área iluminada da imagem processada pelo método de Otsu. (b) Segmentação da área iluminada da imagem original.



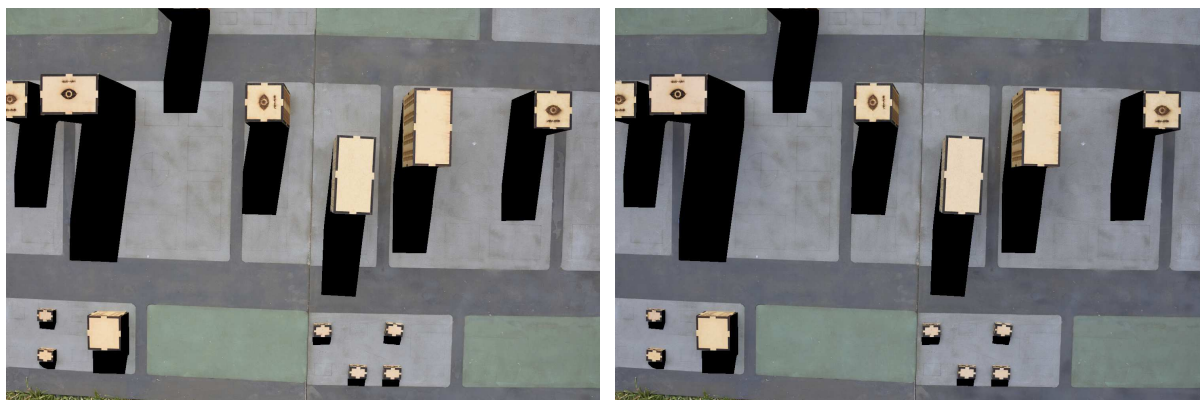
- (c) Mapa de similaridade estrutural, evidenciando regiões modificadas da imagem pelo método de Otsu.



Fonte: O autor (2018).

Figura 53 – *Data set 3*: Avaliação da re-iluminação da região iluminada processada pelo método de K-means

- (a) Segmentação da área iluminada da imagem processada pelo método de K-means. (b) Segmentação da área iluminada da imagem original.



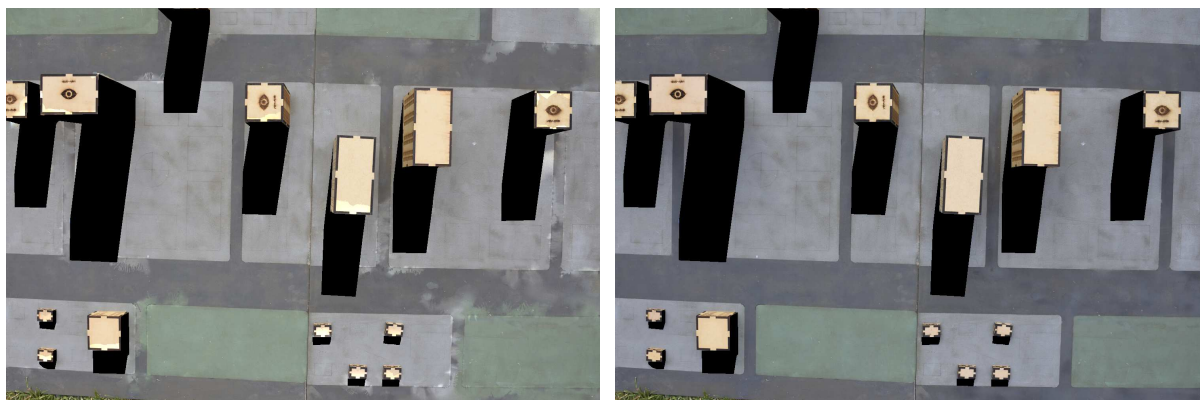
- (c) Mapa de similaridade estrutural, evidenciando regiões modificadas da imagem pelo método de K-means.



Fonte: O autor (2018).

Figura 54 – *Data set 3*: Avaliação da re-iluminação da região iluminada processada pelo método de Gong.

- (a) Segmentação da área iluminada da imagem processada pelo método de Gong. (b) Segmentação da área iluminada da imagem original.



- (c) Mapa de similaridade estrutural, evidenciando regiões modificadas da imagem pelo método de Gong.



Fonte: O autor (2018).

4.4.3.4 Data set 3: Discussão

O *data set 3* foi gerado em ambiente externo, a imagem com sombra foi adquirida com sol iluminando direto a cena, a imagem sem sombra foi adquirida no momento que uma nuvem bloqueou os raios solares. A imagem com sombra foi selecionada de uma serie de fotos adquiridas para este *data set 3*, a baixa intensidade da sombra foi o motivo da escolha desta imagem.

O método de Otsu obteve um resultado curioso, onde detectou 62,67% da região de sombra, a maior parte da detecção foi na parte de *cast-shadow* na região próxima do objeto que fez a sombra, na Figura 45b não foi possível visualmente notar detecção na parte de *self-shadow* da imagem. interessante notar que a região iluminada da rua também foi considerada sombra pelo método. A re-iluminação da região de sombra analisada pelo valor de SSIM diminuiu em $-1,20\%$ a similaridade com a imagem ideal, visualmente é possível notar na Figura 45a que a região de sombra detectada e re-iluminada foi melhorada.

O método de K-means teve uma baixa acurácia na detecção de sombras 30,06% e é interessante notar que a detecção de sombra na região iluminada (denotada em magenta na Figura 46b) é marcada por riscos e não como regiões. A re-iluminação desta imagem pelo metodo de K-means não obteve um resultado significativo, devido a baixa detecção de sombra e a pouca re-iluminação da imagem, apenas $-0,39\%$.

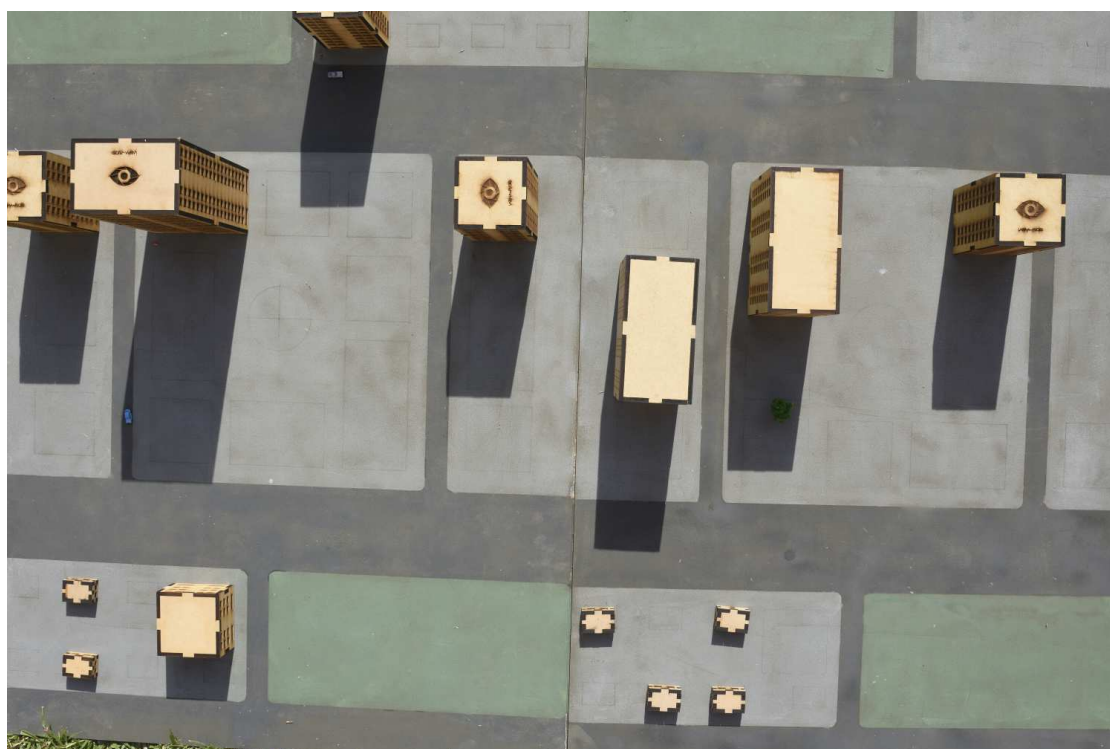
O método de Gong obteve bons resultados na detecção de sombra em regiões de sombra 90,42% porem falhou ao detectar regiões iluminadas da imagem como sombra, especialmente as ruas do lado direito da imagem. A re-iluminação da imagem misturou cores de calçada com a rua e a quadra verde, visualmente é possível notar perda na qualidade de imagem e o valor de SSIM $-2,47\%$ da região de sombra da imagem confirma.

4.4.4 Data set 4

O *data set 4* foi adquirido em ambiente externo com luz natural. Na Figura 55a o sol foi utilizado como fonte de luz direta para criar a sombra. Na Figura 55b foi utilizada uma nuvem bloqueando o sol, criando a cena sem sombra. A máscara de sombra foi criada pela diferença entra a imagem original com sombra e a imagem ideal sem sombra, também foi feito um pós-processamento na imagem de modo a deixar somente as sombras demarcadas, Figura 55c.

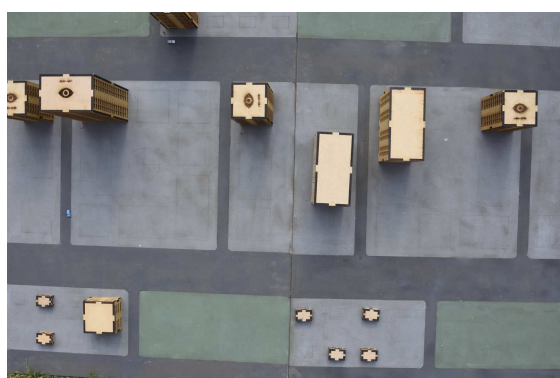
Figura 55 – *Data set 4*: Imagens adquiridas em ambiente externo com fonte de iluminação natural.

(a) Imagem original (com sombra).



(b) Imagem ideal (sem sombra).

(c) Máscara de sombra.



Fonte: O autor (2018).

4.4.4.1 Avaliação de detecção de Sombra

O método de avaliar a detecção de sombra na imagem, definido no capítulo 3.5, é aplicado para cada algoritmo avaliado, obtendo uma representação quantitativa pela Tabela 12. A representação qualitativa da detecção de sombra apresenta-se na forma de imagem, onde a máscara original, sobreposta máscara de detecção do algoritmo avaliado são sobrepostas e comparadas.

O resultado do método de Otsu representado na Figura 56, detectou 71,58% das sombras e 98,88% da região iluminada.

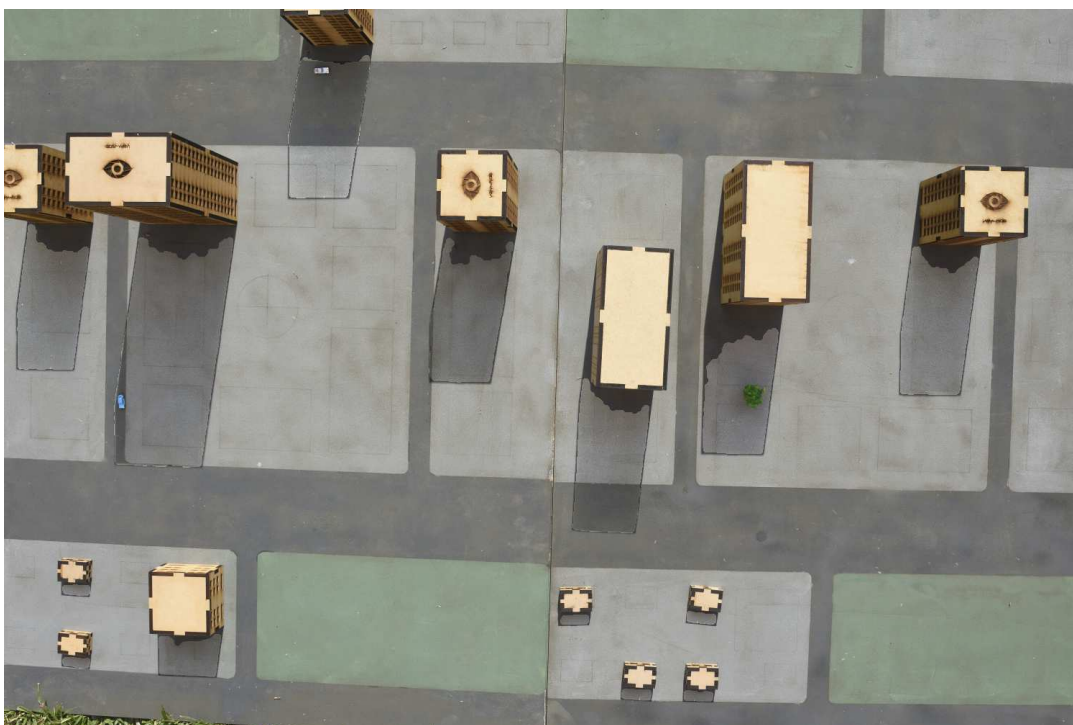
O resultado do método de K-means representado na Figura 57 apresenta uma detecção de 60,07% na região de sombra e 98,39% na região iluminada.

O resultado do método de Gong representado na Figura 58 apresenta uma alta detecção de sombra (92,38%) e detecta 96,58% da região iluminada.

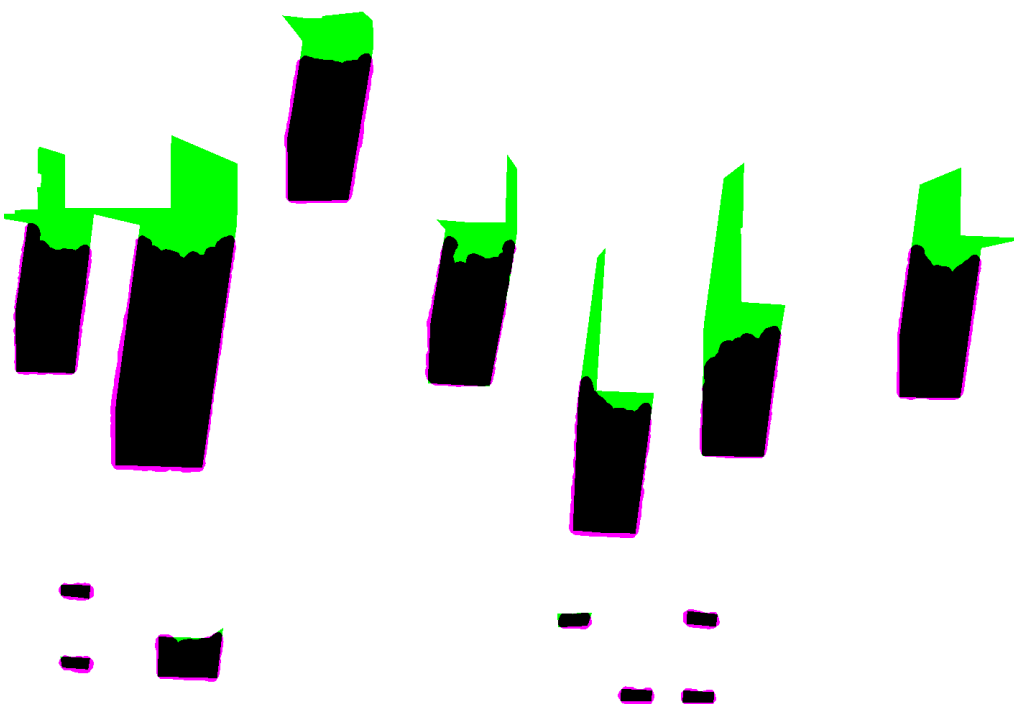
Na avaliação da imagem geral (τ) o método de Gong foi o que detectou melhor a sombra (95,97%) seguido de Otsu (94,97%)

Tabela 12 – *Data set 4*: Tabela de avaliação de detecção de sombra.

Image 4	Otsu	Kmeans	Gong
η_s	0.7158	0.6007	0.9238
η_n	0.9888	0.9839	0.9658
p_s	0.9146	0.8617	0.8184
p_n	0.9542	0.9365	0.9870
τ	0.9497	0.9290	0.9597

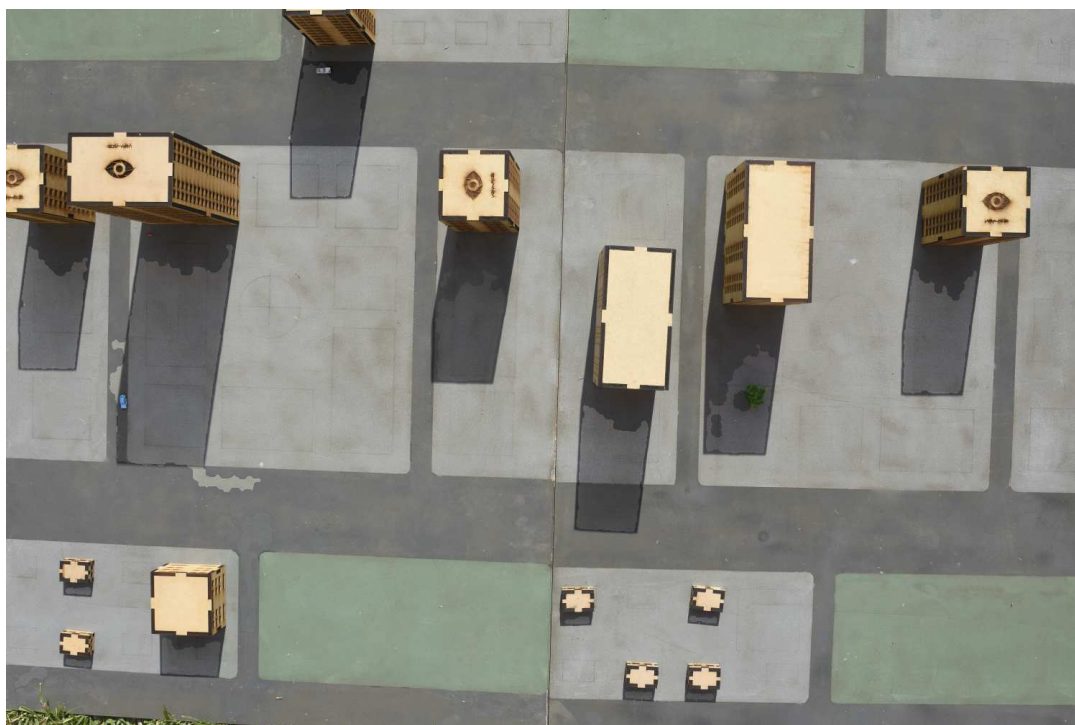
Figura 56 – *Data set 4*: Avaliação de detecção do método de Otsu.

(a) Imagem com sombra removida pelo método de Otsu

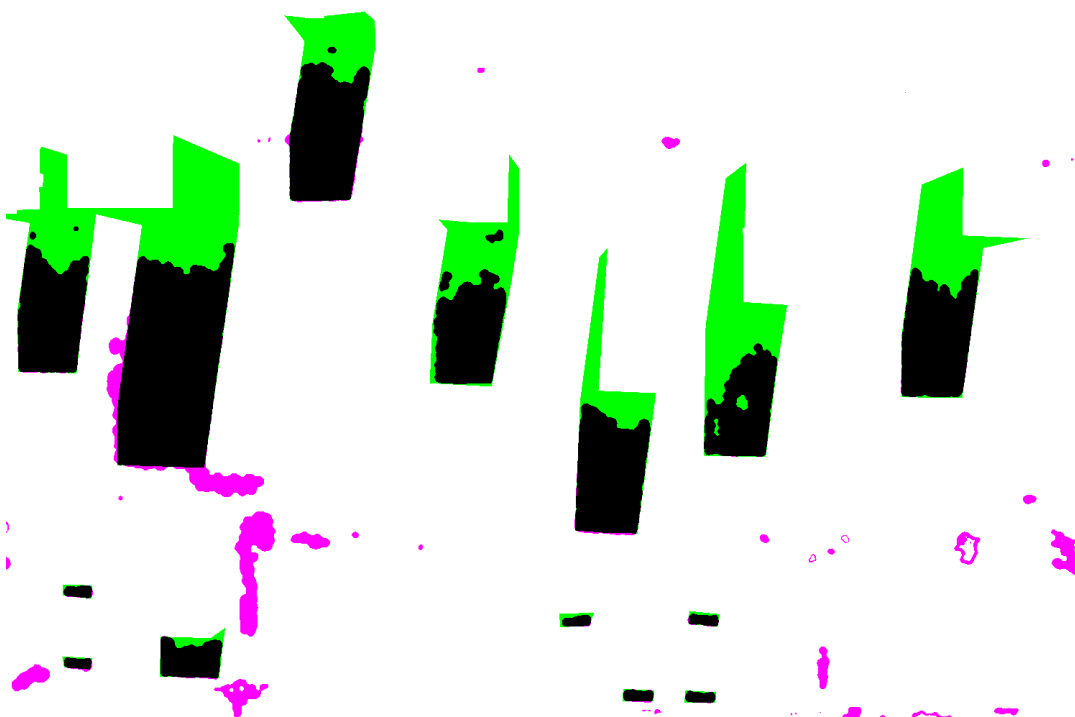


(b) Sobreposição da máscara de sombras original com a máscara de sombras detectada pelo método de Otsu . Em verde está a máscara de sombra original, em magenta a máscara de sombras detectada pelo método, a sobreposição das sombras gera a cor preta e a cor branca significa a sobreposição da parte iluminada da imagem.

Fonte: O autor (2018).

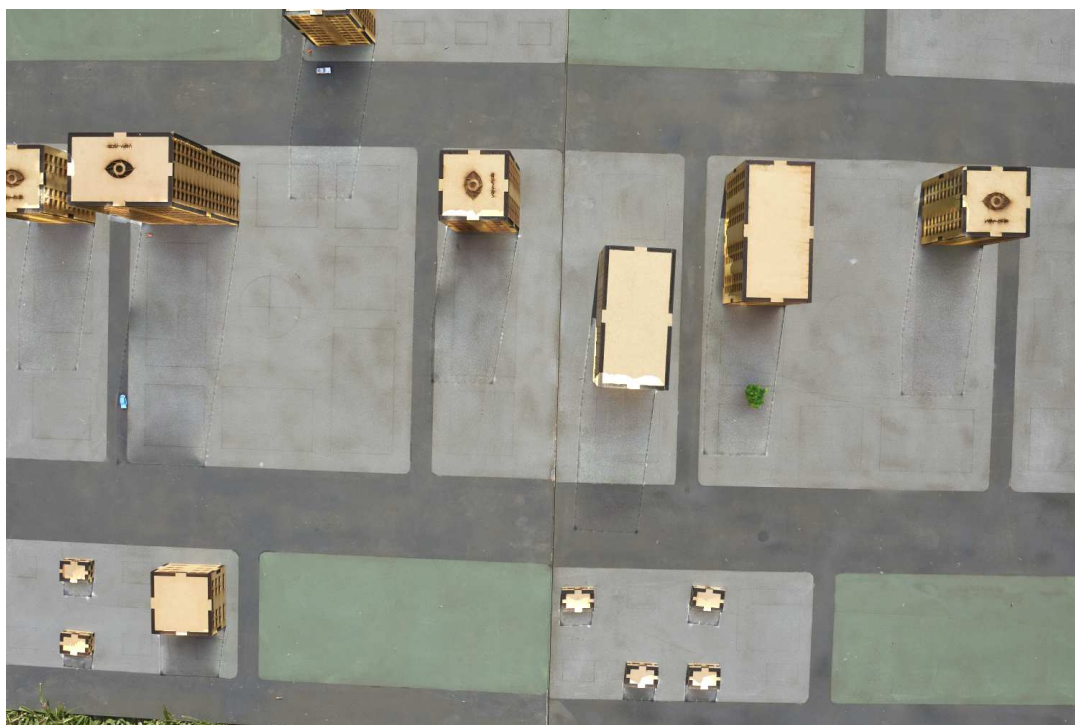
Figura 57 – *Data set 4*: Avaliação de detecção do método de K-means.

(a) Imagem com sombra removida pelo método de K-means

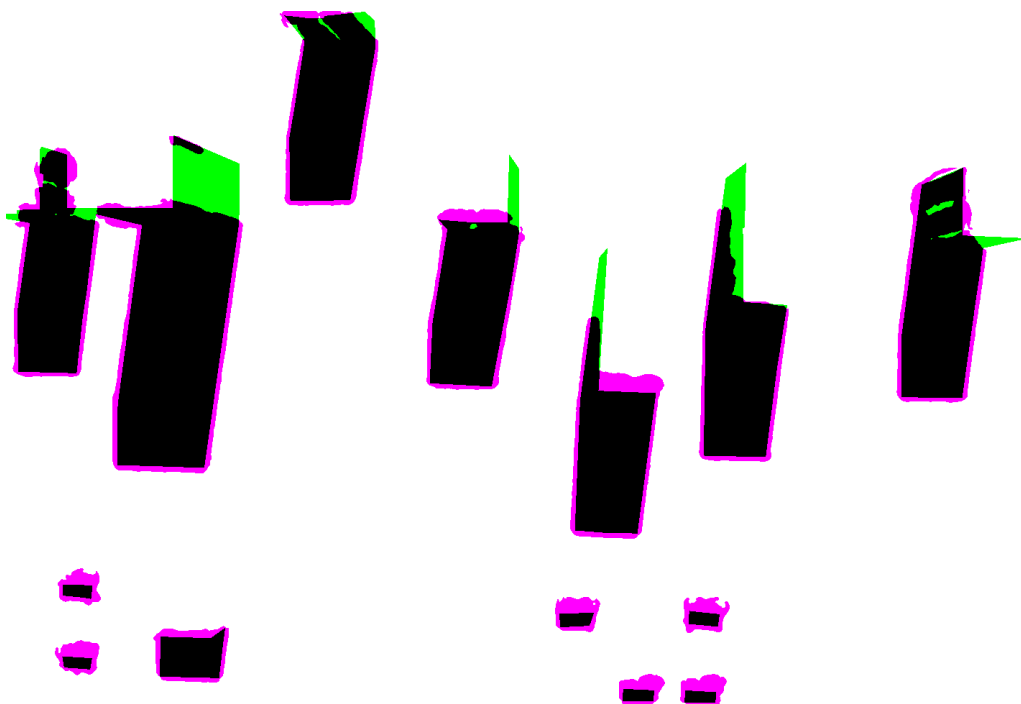


(b) Sobreposição da máscara de sombras original com a máscara de sombras detectada pelo método de K-means. Em verde está a máscara de sombra original, em magenta a máscara de sombras detectada pelo método, a sobreposição das sombras gera a cor preta e a cor branca significa a sobreposição da parte iluminada da imagem.

Fonte: O autor (2018).

Figura 58 – *Data set 4*: Avaliação de detecção do método de Gong.

(a) Imagem com sombra removida pelo método de Gong.



(b) Sobreposição da máscara de sombras original com a máscara de sombras detectada pelo método de Gong. Em verde está a máscara de sombra original, em magenta a máscara de sombras detectada pelo método, a sobreposição das sombras gera a cor preta e a cor branca significa a sobreposição da parte iluminada da imagem.

Fonte: O autor (2018).

4.4.4.2 Avaliação de re-iluminação de áreas sombreadas

Seguindo a metodologia descrita no capítulo 3.6 segmentamos a imagem em duas imagens, a imagem com regiões iluminada e com regiões de sombra. Devido a existência de uma árvore na região de sombra da imagem original e a falta dela na imagem ideal, será removida da máscara de sombras a região com a árvore para não influenciar na avaliação, a máscara de sombra pode para esta avaliação pode ser vista na Figura 59. Da imagem original recortamos a região de sombra com a máscara de sombra original, Figura 60a. Da imagem ideal segmentamos regiões de sombra utilizando a máscara de sombras original, Figura 60b. O mapa de similaridade entre as imagens ideal e original na região de sombra na Figura 60c, criando o valor de referência.

A avaliação do método de Otsu encontra-se na Figura 61 e é possível notar visualmente uma melhora na imagem apesar do índice de similaridade com a imagem ideal ser negativo devido a aquisição da imagem ideal em ambiente externo.

O método de K-means na Figura 62 apresenta uma re-iluminação sutil visualmente e o valor da similaridade com a imagem ideal de $-0,73\%$ corrobora com a sensação visual.

método de Gong na Figura 63. apresenta uma re-iluminação perceptível visualmente e um valor de similaridade de $-2,02\%$ com a imagem ideal devido a forma de iluminação da imagem ideal.

A Tabela 16 compara os métodos com o valor de referência.

Tabela 13 – *Data set 4*: Índice de similaridade entre as regiões de sombra

	Original	Otsu	K-means	Gong
SSIM	93,08%	91,53%	92,35%	91,06%
Modificação	–	-1,55%	-0,73%	-2,02%

Figura 59 – *Data set 4*: Modificação da máscara de sombras devido a árvore na sombra não existir na imagem ideal.

(a) Máscara de sombras com árvore.

(b) Máscara de sombras sem árvore.



Fonte: O autor (2018).

Figura 60 – *Data set 4*: Referência para a avaliação de re-iluminação da região de sombras.

- (a) Segmentação da região com sombra da imagem com sombra. (b) Segmentação da região com sombra da imagem ideal.



- (c) Mapa de similaridade da região de sombra entre a imagem com sombra e a imagem ideal. O valor de similaridade é 93,08% e será a base para avaliar a re-iluminação dos métodos.



Fonte: O autor (2018).

Figura 61 – *Data set 4*: Avaliação de re-iluminação da região de sombras do método de Otsu.

- (a) Segmentação da região com sombra da imagem modificada pelo método de Otsu. (b) Segmentação da região com sombra da imagem ideal.



- (c) Mapa de similaridade da região de sombra entre a imagem com sombra removida pelo método de Otsu e a imagem ideal. O valor de similaridade é 91,53%, comparando com o valor de referência mostra que o método de Otsu modificou em $-1,55\%$ a imagem.



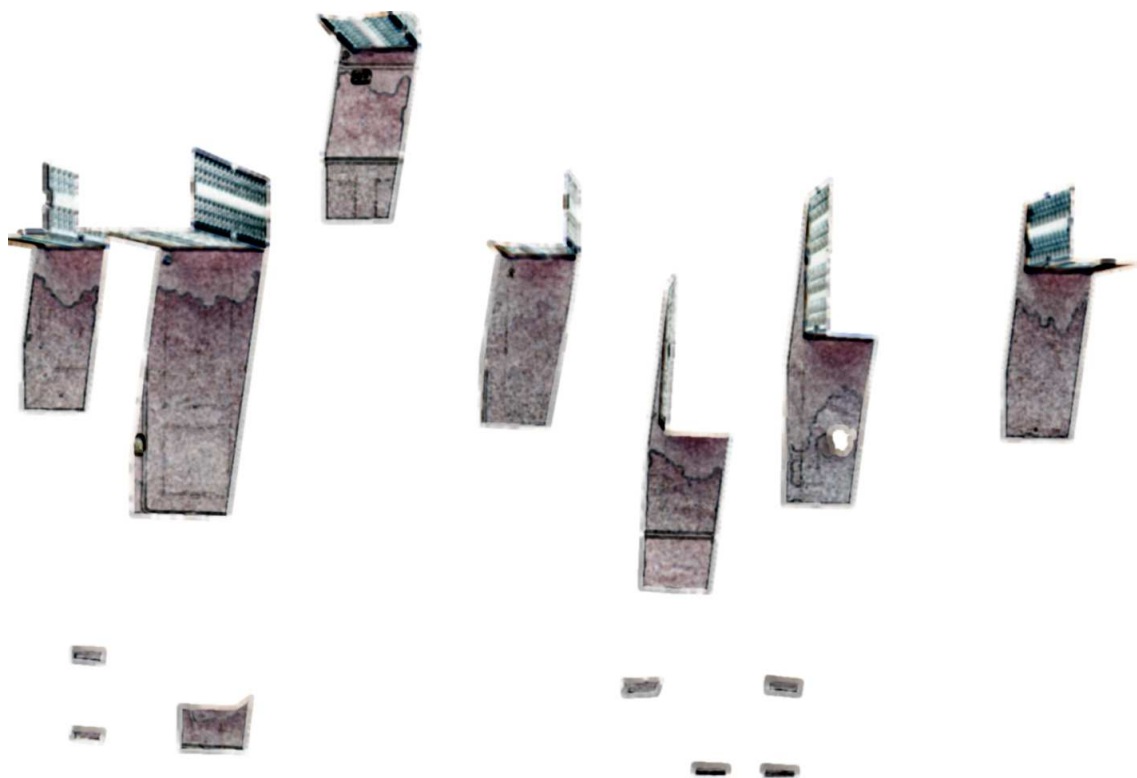
Fonte: O autor (2018).

Figura 62 – *Data set 4*: Avaliação de re-iluminação da região de sombras do método de K-means.

- (a) Segmentação da região com sombra da imagem modificada pelo método de K-means. (b) Segmentação da região com sombra da imagem ideal.



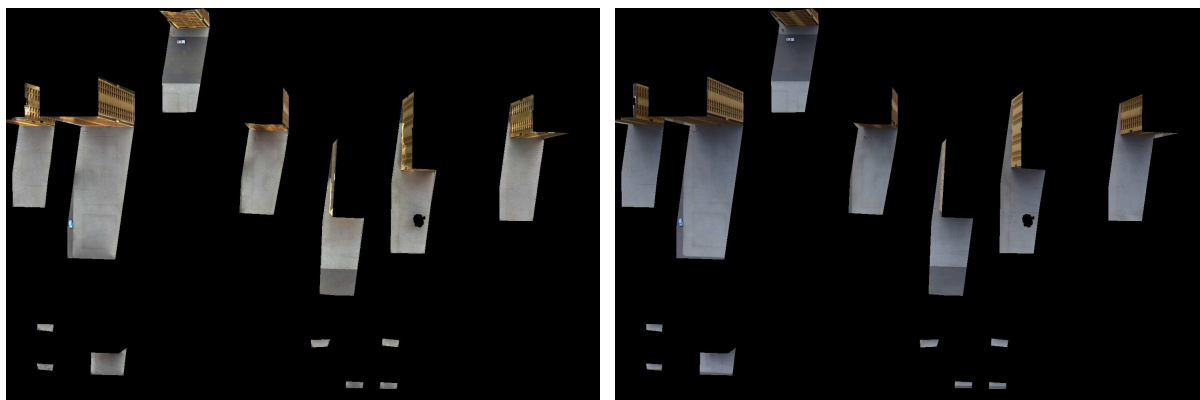
- (c) Mapa de similaridade da região de sombra entre a imagem com sombra removida pelo método de K-means e a imagem ideal. O valor de similaridade é 92,35%, comparando com o valor de referência mostra que o método de K-means modificou a imagem em $-0,73\%$.



Fonte: O autor (2018).

Figura 63 – *Data set 4*: Avaliação de re-iluminação da região de sombras do método de Gong.

- (a) Segmentação da região com sombra da imagem modificada pelo método de Gong. (b) Segmentação da região com sombra da imagem ideal.



- (c) Mapa de similaridade da região de sombra entre a imagem com sombra removida pelo método de Gong e a imagem ideal. O valor de similaridade é 91,06%, comparando com o valor de referência mostra que o método de Gong modificou a imagem em $-2,02\%$.



Fonte: O autor (2018).

4.4.4.2.1 Avaliação de re-iluminação de áreas iluminada

Os métodos de remoção de sombra, como visto na avaliação de detecção de sombras, algumas vezes consideram regiões iluminadas da imagem como sombra. A detecção e posterior re-iluminação da área iluminada da imagem conta como fator negativo na avaliação do algoritmo. Avaliar quanto da região iluminada da imagem foi re-iluminada é feito comparando o índice de similaridade entre a região iluminada da imagem original e a região iluminada das imagens processadas pelos métodos. A Tabela 14 apresenta a similaridade estrutural da região iluminada da imagem original com as imagens processadas pelos métodos avaliados. A avaliação do método de Otsu está na Figura 64, não é perceptível visualmente a modificação da parte iluminada da imagem e o valor do índice de similaridade corrobora com uma semelhança entre imagens de 99,94%

A avaliação do método de K-means está na Figura 65 apresenta uma região re-iluminada em que a cor da rua visivelmente foi trocada pela cor da calçada e o valor de similaridade de 99,82% não representa tão bema sensação visual da imagem.

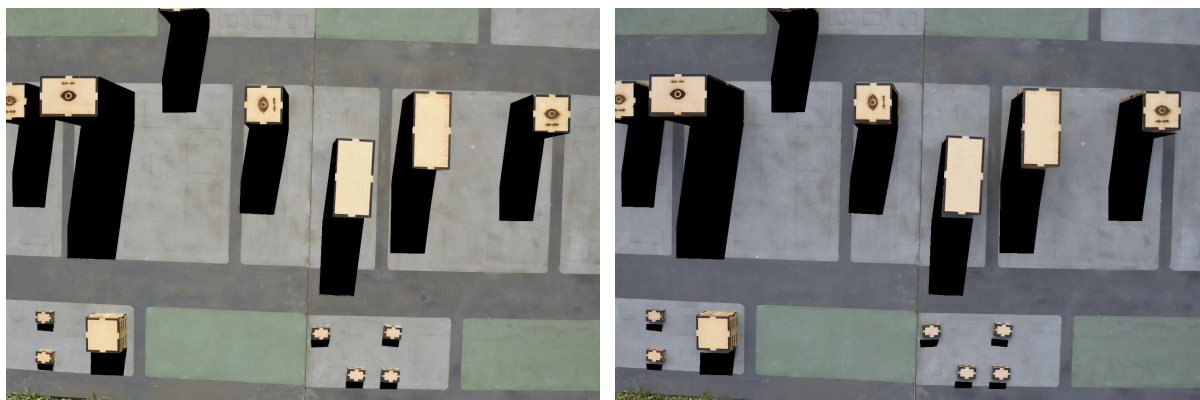
A avaliação do método de Gong está na Figura 66 apresenta uma re-iluminação visualmente não perceptível apesar de ter um índice de similaridade menor que o K-means.

Tabela 14 – *Data set 4*: Avaliação da re-iluminação da região iluminada da imagem pelo método de similaridade estrutural

	Otsu	K-means	Gong
SSIM	99,94%	99,82%	99,52%

Figura 64 – *Data set 4*: Avaliação da re-iluminação da região iluminada processada pelo método de Otsu.

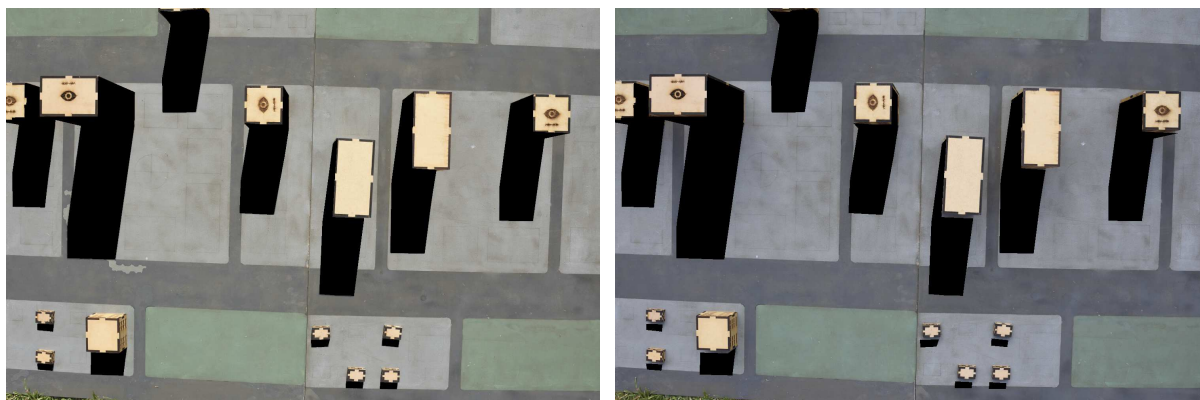
- (a) Segmentação da área iluminada da imagem processada pelo método de Otsu. (b) Segmentação da área iluminada da imagem original.



- (c) Mapa de similaridade estrutural, evidenciando regiões modificadas da imagem pelo método de Otsu.

Figura 65 – *Data set 4*: Avaliação da re-iluminação da região iluminada processada pelo método de K-means

- (a) Segmentação da área iluminada da imagem processada pelo método de K-means. (b) Segmentação da área iluminada da imagem original.



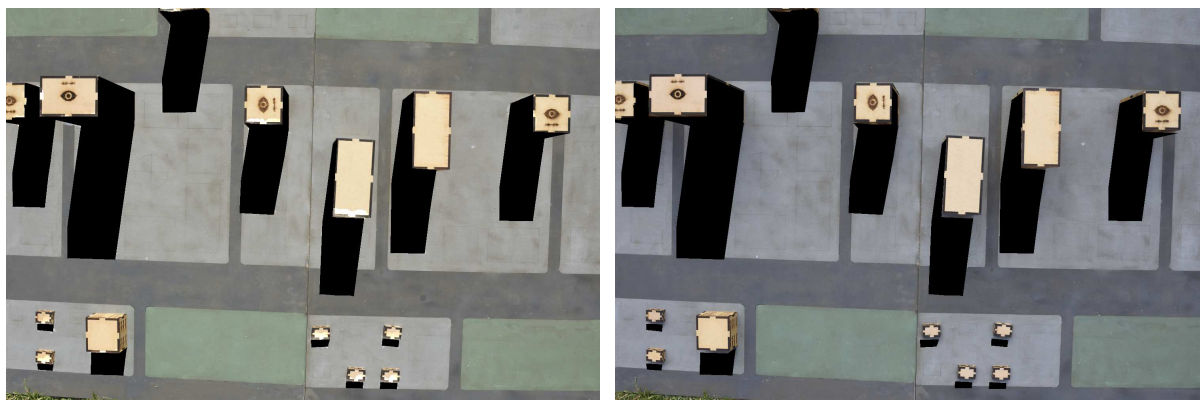
- (c) Mapa de similaridade estrutural, evidenciando regiões modificadas da imagem pelo método de K-means.



Fonte: O autor (2018).

Figura 66 – *Data set 4*: Avaliação da re-iluminação da região iluminada processada pelo método de Gong.

- (a) Segmentação da área iluminada da imagem processada pelo método de Gong. (b) Segmentação da área iluminada da imagem original.



- (c) Mapa de similaridade estrutural, evidenciando regiões modificadas da imagem pelo método de Gong.



Fonte: O autor (2018).

4.4.4.3 Data set 4: Discussão

O *data set 4* faz parte do mesmo conjunto de imagens adquiridas do *data set 3*, porém a intensidade da sombra na imagem original é maior. É interessante notar uma árvore na sombra do segundo prédio no sentido da direita para esquerda da imagem original, ela não está na imagem ideal do *data set 4* e foi necessário ajustar a máscara de sombras para a avaliação da remoção de sombra na região de sombra da imagem.

O método de Otsu detectou 70,58% não é um resultado expressivo, porém se notarmos que quase não houve erro em detectar regiões iluminadas corretamente faz deste um ótimo resultado. Novamente o método de Otsu não considerou regiões de *self-shadow* como sombras. Na figura 56b é possível notar que o erro relacionado a detecção de regiões iluminadas como sombra está totalmente relacionado com a borda da sombra original. Analisando o resultado da remoção de sombra na Figura 56a é possível notar visualmente a melhora na região detectada como sombra, porém as bordas da detecção estão escuras.

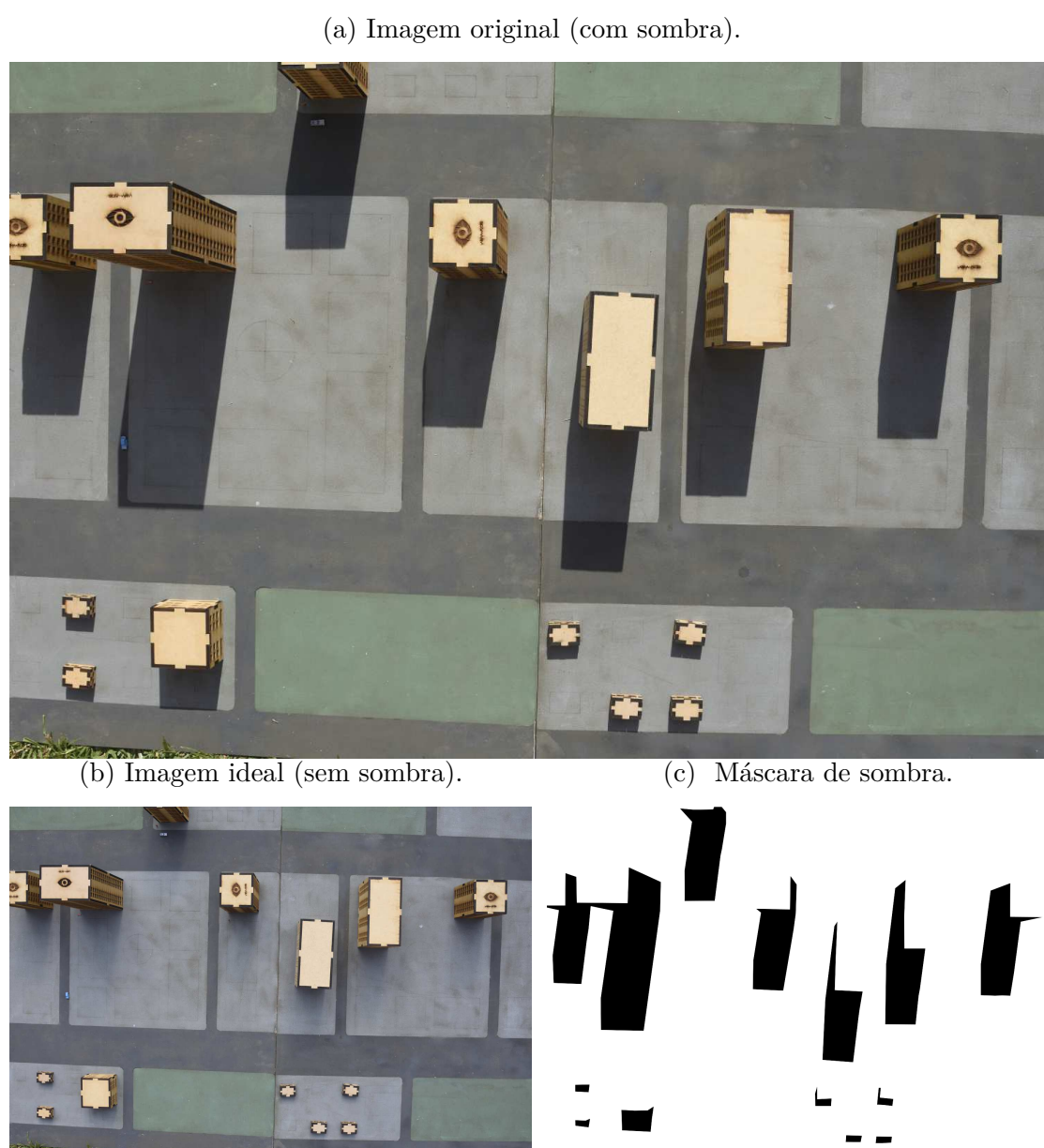
O método de K-means detectou 60,07% da região de sombra da imagem original, é curioso notar que os valores de detecção da região iluminada ηn são semelhantes ao método de Otsu porém, as regiões onde foram detectadas sombras na parte iluminada da imagem são diferentes. A re-iluminação é interessante notar que a região iluminada que foi detectada como sombra perto do segundo prédio a esquerda, foi re-iluminada como uma calçada ao invés de uma rua.

O método de Gong apresenta uma detecção de sombra de 92,38% e uma detecção de região iluminada de 96,58% porém a re-iluminação ocorre uma perda de similaridade da imagem devido a saturação, que pode ser notada pelo índice de similaridade e visualmente.

4.4.5 Data set 5

O *data set 5* foi adquirido em ambiente externo, com iluminação natural. Na Figura 67a a luz solar foi utilizada como fonte de luz direta para criar a sombra. Na Figura 67b foi utilizada uma sombra bloqueando a luz solar direta, criando a cena sem sombra. A máscara de sombra foi criada pela diferença entra a imagem original com sombra e a imagem ideal sem sombra, também foi feito um pós-processamento na imagem de modo a deixar somente as sombras demarcadas, Figura 67c.

Figura 67 – *Data set 5*: Imagens adquiridas em ambiente externo com fonte de iluminação natural.



Fonte: O autor (2018).

4.4.5.1 Avaliação de detecção de Sombra

O método de avaliar a detecção de sombra na imagem, definido no capítulo 3.5, é aplicado para cada algoritmo avaliado, obtendo uma representação quantitativa pela Tabela 15. A representação qualitativa da detecção de sombra apresenta-se na forma de imagem, onde a máscara original, sobreposta máscara de detecção do algoritmo avaliado são sobrepostas e comparadas.

O resultado do método de Otsu representado na Figura 68, detecta 72,20% da região de sombra corretamente e 99,09% da região iluminada da imagem.

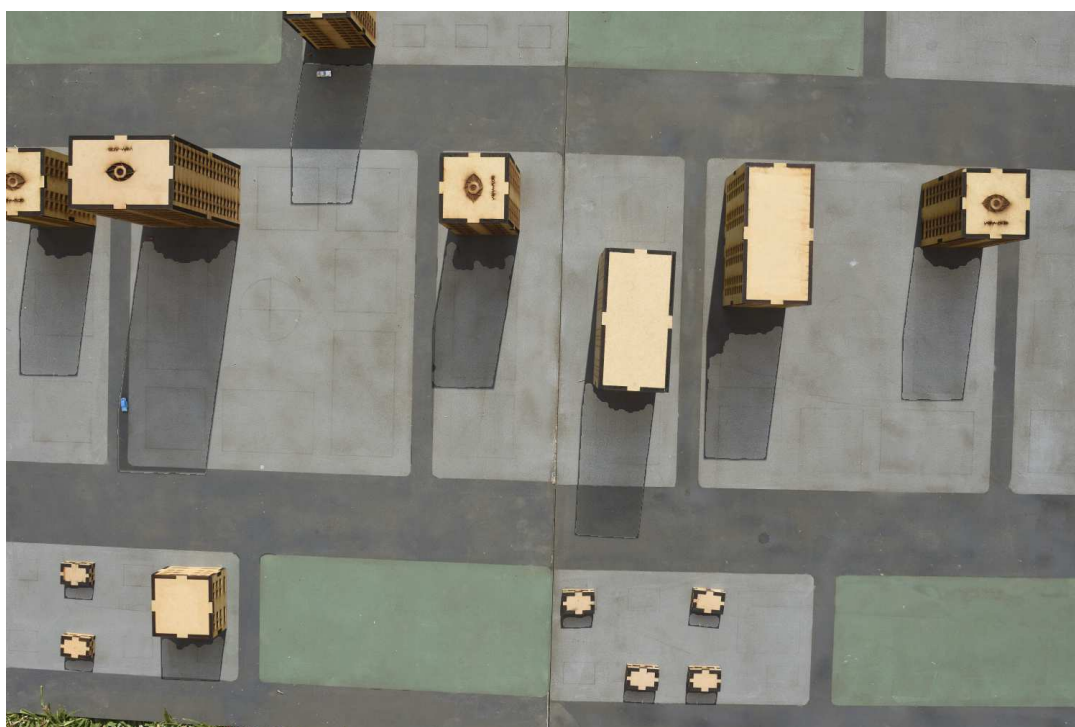
O resultado do método de K-means representado na Figura 69 apresenta uma detecção de 59,25% na região de sombra e 97,79% na região iluminada.

O resultado do método de Gong representado na Figura 70 apresenta uma alta detecção de sombra (85,14%) e regiões iluminadas (93,23%).

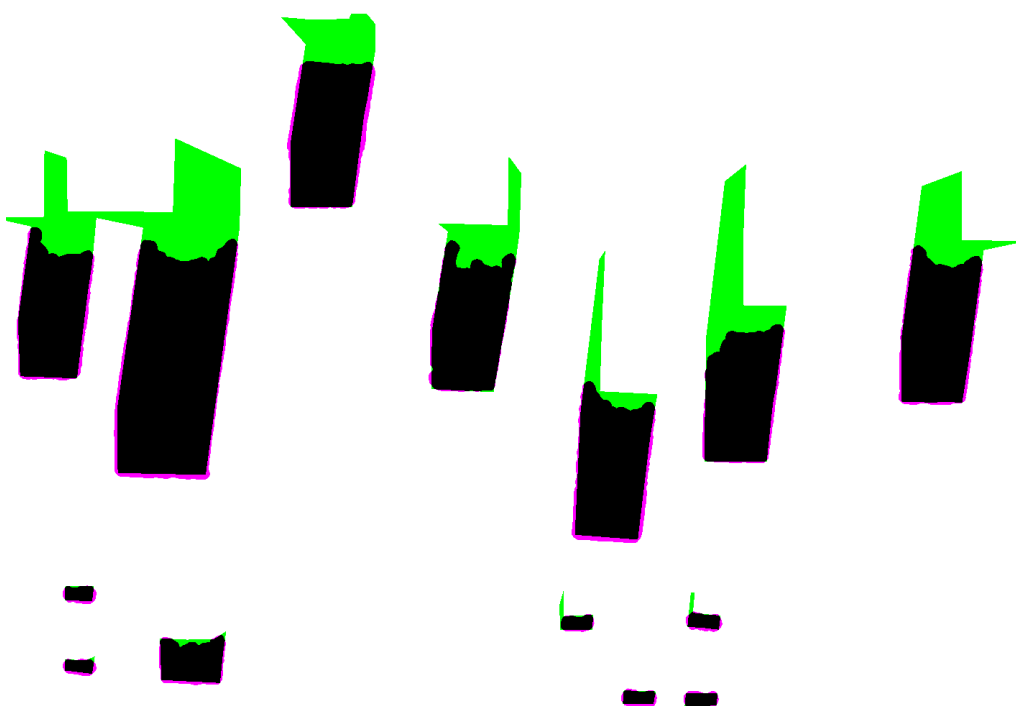
Na avaliação da imagem geral (τ) Otsu foi melhor que K-means e o método de Gong.

Tabela 15 – *Data set 5*: Tabela de avaliação de detecção de sombra.

Image 5	Otsu	Kmeans	Gong
η_s	0.7220	0.5925	0.8514
η_n	0.9909	0.9779	0.9323
p_s	0.9313	0.8200	0.6817
p_n	0.9544	0.9338	0.9736
τ	0.9518	0.9218	0.9206

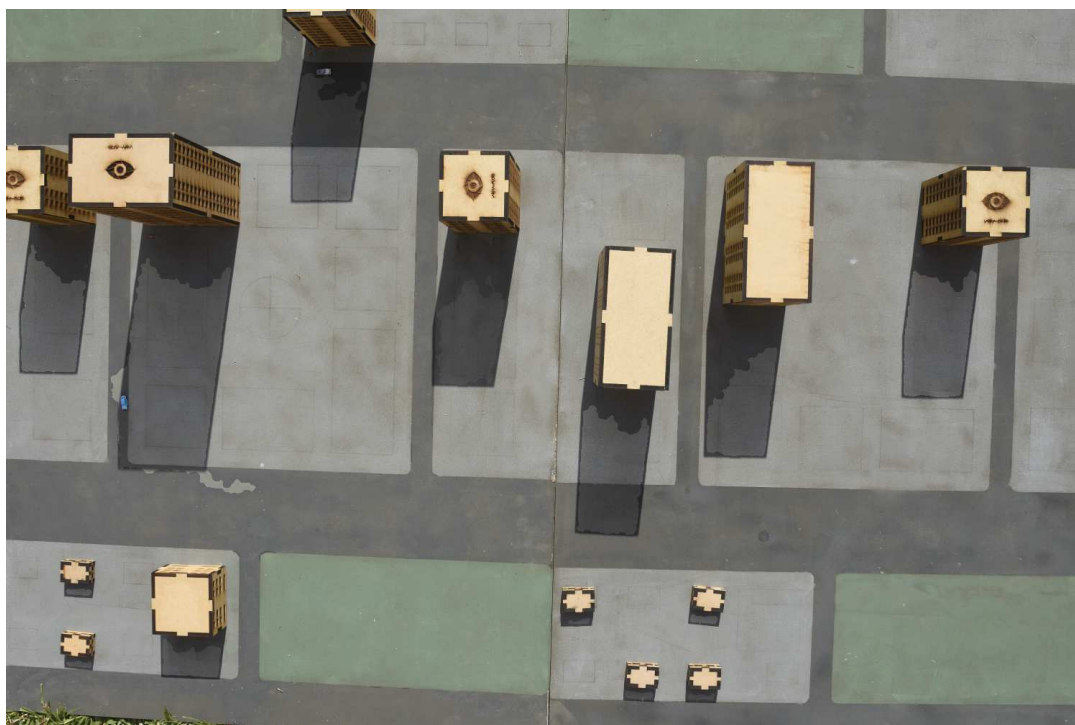
Figura 68 – *Data set 5*: Avaliação de detecção do método de Otsu.

(a) Imagem com sombra removida pelo método de Otsu

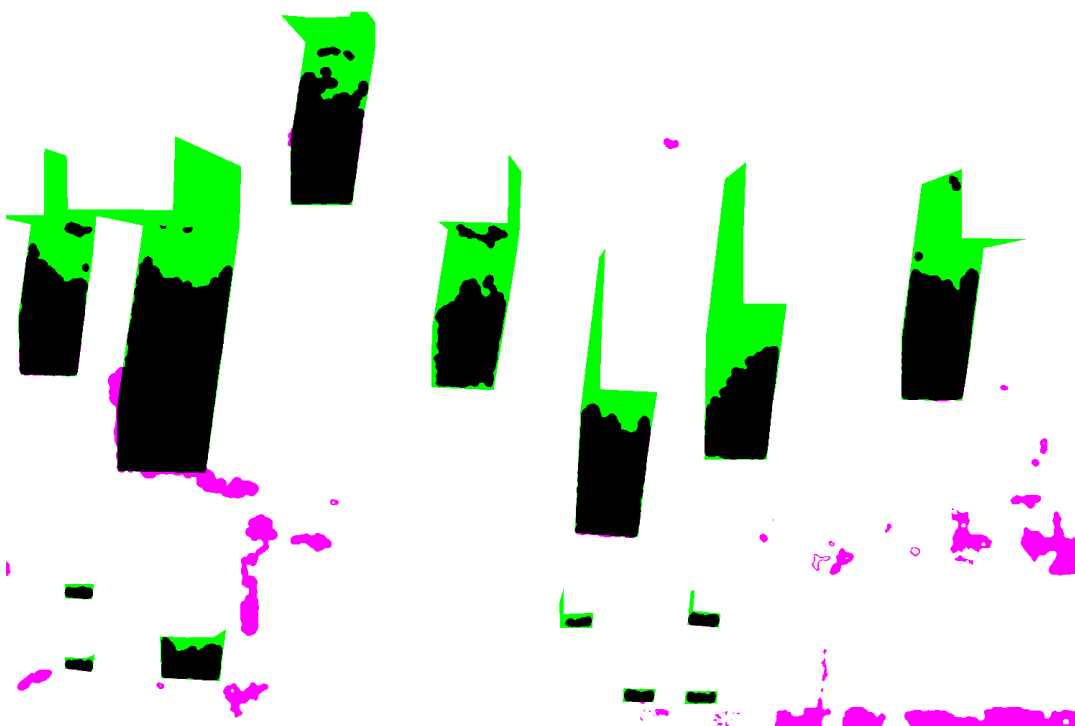


(b) Sobreposição da máscara de sombras original com a máscara de sombras detectada pelo método de Otsu. Em verde está a máscara de sombra original, em magenta a máscara de sombras detectada pelo método, a sobreposição das sombras gera a cor preta e a cor branca significa a sobreposição da parte iluminada da imagem.

Fonte: O autor (2018).

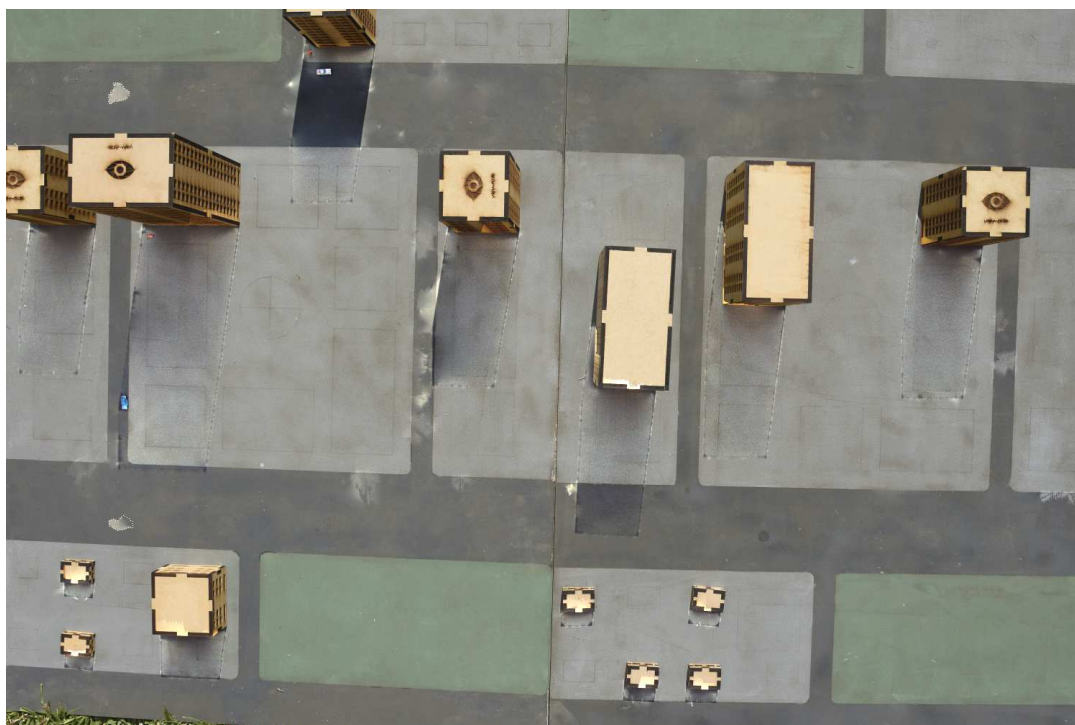
Figura 69 – *Data set 5*: Avaliação de detecção do método de K-means.

(a) Imagem com sombra removida pelo método de K-means



(b) Sobreposição da máscara de sombras original com a máscara de sombras detectada pelo método de K-means. Em verde está a máscara de sombra original, em magenta a máscara de sombras detectada pelo método, a sobreposição das sombras gera a cor preta e a cor branca significa a sobreposição da parte iluminada da imagem.

Fonte: O autor (2018).

Figura 70 – *Data set 5*: Avaliação de detecção do método de Gong.

(a) Imagem com sombra removida pelo método de Gong.



(b) Sobreposição da máscara de sombras original com a máscara de sombras detectada pelo método de Gong. Em verde está a máscara de sombra original, em magenta a máscara de sombras detectada pelo método, a sobreposição das sombras gera a cor preta e a cor branca significa a sobreposição da parte iluminada da imagem.

Fonte: O autor (2018).

4.4.5.2 Avaliação de re-iluminação de áreas sombreadas

Seguindo a metodologia descrita no capítulo 3.6 segmentamos a imagem em duas imagens, a imagem com regiões iluminada e com regiões de sombra. Da imagem original segmentamos a região de sombra com a máscara de sombra original, Figura 71a. Da imagem ideal segmentamos regiões de sombra utilizando a máscara de sombras original, Figura 71b. O mapa de similaridade entre as imagens ideal e original na região de sombra na Figura 71c, criando o valor de referência.

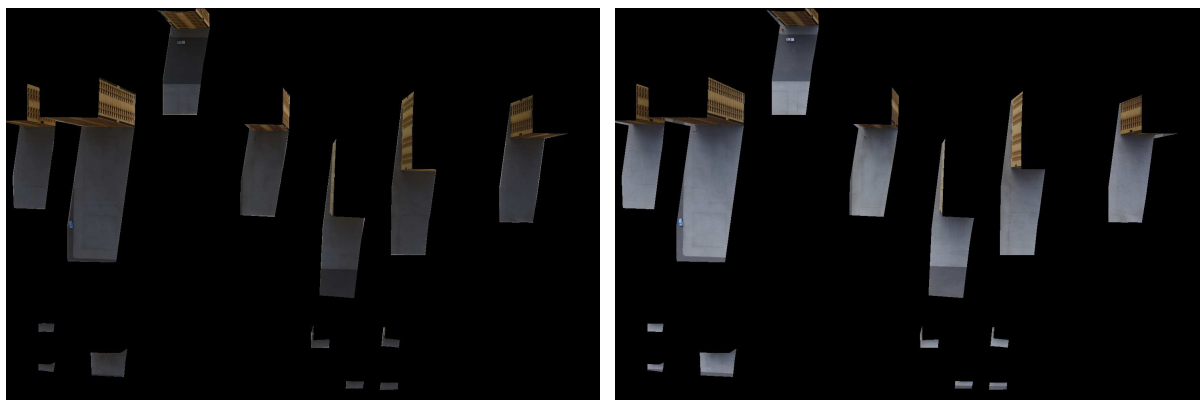
A avaliação do método de Otsu encontra-se na Figura 72, do método de K-means na Figura 73 e do método de Gong na Figura 74. A Tabela 16 compara os métodos com o valor de referência, visualmente não é possível notar diferença na re-iluminação da região de sombra, somente avaliando pelo índice de similaridade é possível notar a diferença.

Tabela 16 – *Data set 5*: Índice de similaridade entre as regiões de sombra

	Original	Otsu	K-means	Gong
SSIM	92,61%	91,26%	92,02%	91,52%
Modificação	–	-1,35%	-0,59%	-1,09%

Figura 71 – *Data set 5*: Referência para a avaliação de re-iluminação da região de sombras.

- (a) Segmentação da região com sombra da imagem com sombra . (b) Segmentação da região com sombra da imagem ideal.



- (c) Mapa de similaridade da região de sombra entre a imagem com sombra e a imagem ideal. O valor de similaridade é 92,61% e será a base para avaliar a re-iluminação dos métodos.



Fonte: O autor (2018).

Figura 72 – *Data set 5*: Avaliação de re-iluminação da região de sombras do método de Otsu.

- (a) Segmentação da região com sombra da imagem modificada pelo método de Otsu. (b) Segmentação da região com sombra da imagem ideal.



- (c) Mapa de similaridade da região de sombra entre a imagem com sombra removida pelo método de Otsu e a imagem ideal. O valor de similaridade é 91,26%, comparando com o valor de referência mostra que o método de Otsu modificou o SSIM em $-1,35\%$.



Fonte: O autor (2018).

Figura 73 – *Data set 5*: Avaliação de re-iluminação da região de sombras do método de K-means.

- (a) Segmentação da região com sombra da imagem modificada pelo método de K-means. (b) Segmentação da região com sombra da imagem ideal.



- (c) Mapa de similaridade da região de sombra entre a imagem com sombra removida pelo método de K-means e a imagem ideal. O valor de similaridade é 92,02%, comparando com o valor de referência mostra que o método de K-means modificou a imagem em $-0,59\%$.



Fonte: O autor (2018).

Figura 74 – *Data set 5*: Avaliação de re-iluminação da região de sombras do método de Gong.

- (a) Segmentação da região com sombra da imagem modificada pelo método de Gong. (b) Segmentação da região com sombra da imagem ideal.



- (c) Mapa de similaridade da região de sombra entre a imagem com sombra removida pelo método de Gong e a imagem ideal. O valor de similaridade é 91,52%, comparando com o valor de referência mostra que o método de Gong modificou a imagem em $-1,09\%$.



Fonte: O autor (2018).

4.4.5.2.1 Avaliação de re-iluminação de áreas iluminada

Os métodos de remoção de sombra, como visto na avaliação de detecção de sombras, algumas vezes consideram regiões iluminadas da imagem como sombra. A detecção e posterior re-iluminação da área iluminada da imagem conta como fator negativo na avaliação do algoritmo. Avaliar quanto da região iluminada da imagem foi re-iluminada é feito comparando o índice de similaridade entre a região iluminada da imagem original e a região iluminada das imagens processadas pelos métodos. A Tabela 17 apresenta a similaridade estrutural da região iluminada da imagem original com as imagens processadas pelos métodos avaliados. A avaliação do método de Otsu está na Figura 75 e não apresenta uma modificação visual perceptível e o índice de similaridade com a imagem original é de 99,97%.

A avaliação do método de K-means está na Figura 76 é perceptível a re-iluminação da rua com pixel de cores da calçada, apesar do índice de similaridade ser alto(99,89%).

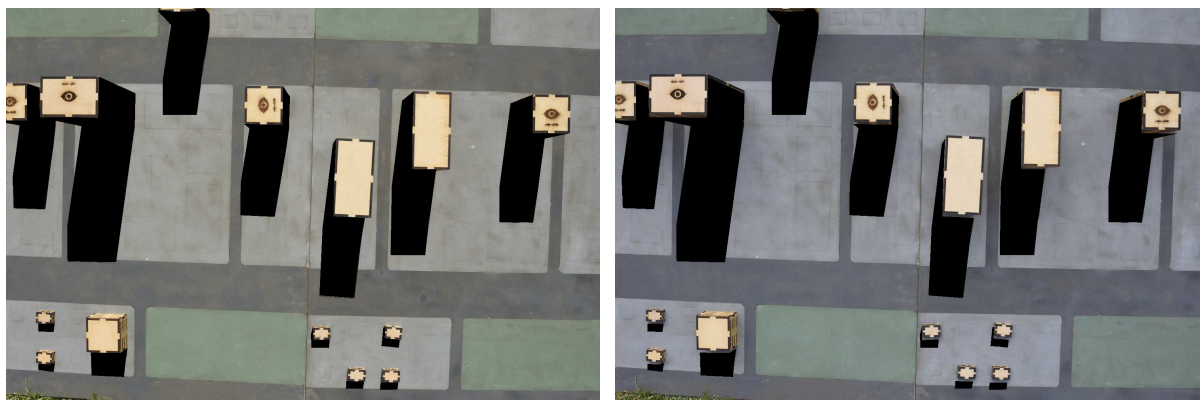
A avaliação do método de Gong está na Figura 77 apresenta o índice de similaridade com a imagem original de 99,22% porém, visualmente regiões re-iluminadas erroneamente comprometem a qualidade da imagem.

Tabela 17 – *Data set 5*: Avaliação da re-iluminação da região iluminada da imagem pelo método de similaridade estrutural

	Otsu	K-means	Gong
SSIM	99,97%	99,86%	99,22%

Figura 75 – *Data set 5*: Avaliação da re-iluminação da região iluminada processada pelo método de Otsu.

- (a) Segmentação da área iluminada da imagem processada pelo método de Otsu. (b) Segmentação da área iluminada da imagem original.



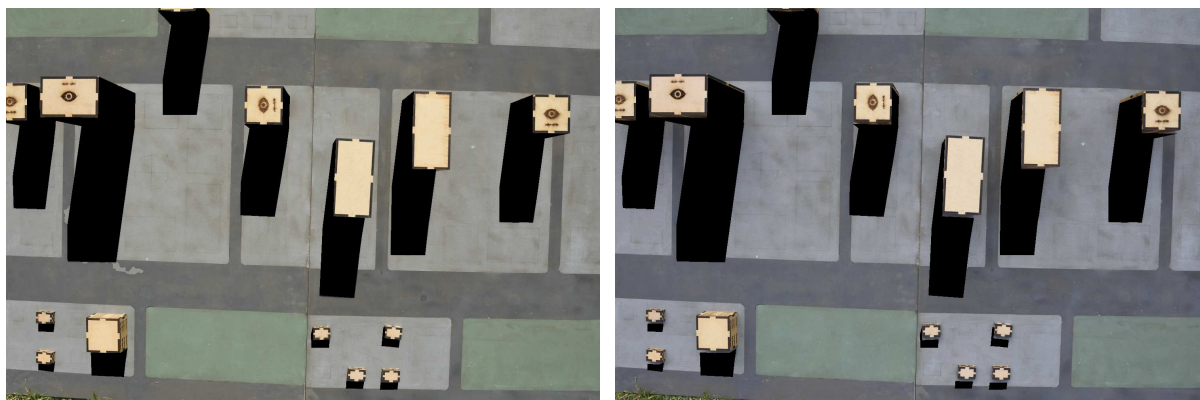
- (c) Mapa de similaridade estrutural, evidenciando regiões modificadas da imagem pelo método de Otsu.



Fonte: O autor (2018).

Figura 76 – *Data set 5*: Avaliação da re-iluminação da região iluminada processada pelo método de K-means

- (a) Segmentação da área iluminada da imagem processada pelo método de K-means. (b) Segmentação da área iluminada da imagem original.



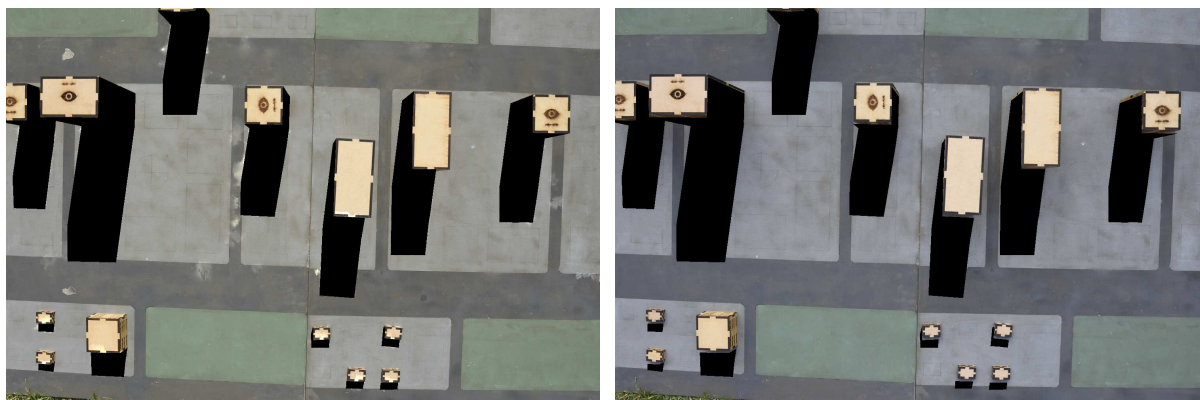
- (c) Mapa de similaridade estrutural, evidenciando regiões modificadas da imagem pelo método de K-means.



Fonte: O autor (2018).

Figura 77 – *Data set 5*: Avaliação da re-iluminação da região iluminada processada pelo método de Gong.

- (a) Segmentação da área iluminada da imagem processada pelo método de Gong. (b) Segmentação da área iluminada da imagem original.



- (c) Mapa de similaridade estrutural, evidenciando regiões modificadas da imagem pelo método de Gong.



Fonte: O autor (2018).

4.4.5.3 *Data set 5*: Discussão

O *data set 5* faz parte do mesmo conjunto de imagens adquiridas do *data set 3* e *4*, ao comparar a imagem original com sombra do *data set 4* com a do *data set 5* aparentemente são iguais, porém ao processar as imagens foram obtidos alguns resultados diferentes.

O método de Otsu obteve uma detecção similar ao do *data set 4*, na re-iluminação o valor de SSIM diminuiu $-1,35\%$ da região de sombra, porém visualmente a imagem melhorou.

O método de K-means diminuiu o valor de ps em 4% e significa que aumentou a região de sombra detectada pelo método porém o aumento não acertou a área de sombra.

O método de Gong diminuiu a detecção correta de sombras em relação ao *data set 4*. Visualmente é possível notar que regiões iluminadas, sem conexão com regiões de sombra, foram detectadas como sombra. Na avaliação de re-iluminação considerando somente a região de sombra da imagem original houve uma diminuição no valor do índice de similaridade estrutural de $-1,09\%$. Analisando a remoção da sombra da imagem completa é possível notar visualmente a remoção da sombra e a modificação das áreas iluminadas da imagem.

5 CONCLUSÃO

De modo a compensar a falta de métodos quantitativos para avaliação de detecção e remoção de sombras de imagens aéreas, este trabalho propõe o desenvolvimento de um sistema de avaliação baseado em um modelo em escala de cenas urbanas onde se replica a aquisição de um sistema WAMI. O objetivo principal deste trabalho é prover imagens sem sombras de cenas previamente conhecidas, para que seja possível a análise (e comparação) quantitativa de diferentes métodos de remoção de sombra. Até então, a literatura se resumia em avaliar os métodos usando máscaras de sombra feitas manualmente por pessoas treinadas, suscetíveis a erros. O que fazia com que fosse difícil quantificar a remoção de sombras em imagens aéreas.

Com o foco em remoção de sombras de imagens aéreas, construiu-se um modelo em escala e emulou-se a aquisição de um sistema WAMI. Um sistema de iluminação foi criado para gerar fontes de luz direta e difusa, imitando o modo como o sol e o céu iluminam uma cena urbana. Apenas utilizando a luz direta, adquirimos as imagens chamadas de *imagens originais*, que possuem sombra. Já as imagens chamadas *imagens ideais*, que não possuem sombra, foram geradas utilizando a luz difusa. As imagens fazem parte do grupo de imagens *data set* e ambas imagens foram adquiridas com a câmera posicionada na mesma posição, para que o registro das imagens fosse facilitado. Assim, dada a imagem original, um método de remoção de sombras ideal deveria reproduzir a imagem ideal. Primeiramente, a análise foi feita em relação à qualidade da detecção de sombras, onde a diferença entre as imagens adquiridas gera um mapa da posição exata das sombras na imagem original. Nesta análise foi utilizado o conceito de matriz de confusão, que quantifica as decisões corretas e errôneas do método. Com estes dados, pode-se calcular a acurácia com relação à detecção de sombras. Para analisar a remoção de sombras, foi utilizado o método de similaridade estrutural para comparar tanto as áreas sombreadas quanto áreas não-sombreadas das imagens produzidas pelos métodos com a imagem ideal.

Os resultados quanto os objetivos específicos foram:

Desenvolver um modelo em escala que simule uma cena para imagens aéreas que leve em conta o tamanho do pixel no chão (GSD). Os resultados apresentados na Seção 4.1, apresentam a medição de um objeto conhecido e o número de pixel que o representa.

Iluminar o modelo de forma a simular a radiação solar levando em conta o efeito atmosférico de dispersão da luz. A iluminação artificial não alcançou a semelhança necessária para ser considerada uma simulação de luz solar. Características espectrais da simulação do espalhamento de luz na atmosfera não atingiram os resultados

esperados, visualmente não é possível perceber a diferença entre sombras de iluminação natural e artificial. Uma análise espectral dos pixel da região de sombra das duas imagens é necessária para descobrir quais variáveis não foram contempladas na sombra simulada em ambiente interno.

Gerar imagens da mesma cena com sombra e sem sombra. Foi possível para os dois modelos de iluminação o natural e o artificial. Na iluminação artificial foi utilizada a técnica de difusão da luz por reflexão para gerar a imagem sem sombra e a iluminação direta para gerar a imagem com sombra. Na iluminação natural foi utilizada uma nuvem para reduzir a iluminação direta e gerar a imagem sem sombras e a imagem com sombras foi feita ao passar da nuvem.

Criar máscaras de sombra para cada par de imagens. Foi alcançado com sucesso, apesar da dificuldade ao binarizar a imagem de diferença, devido ao método de limiarização e também á baixa homogeneidade da iluminação das imagens do *data set*. Foi necessário um pós processamento manual para deixar homogênea a máscara de sombras.

Implementar método que compare a imagem sem sombra (considerada ideal) com a imagem gerada por técnicas de remoção de sombra, quantificando a detecção de sombra e a sua remoção. A avaliação da detecção de sombras pela comparação de uma imagem ideal foi alcançada. A avaliação da remoção de sombras foi alcançada porém poderia ficar melhor se houvesse uma homogeneidade entre a imagem com sombra e a sem sombra.

Quanto aos conjuntos de imagens:

O *data set 1* utilizou somente iluminação artificial direta e refletida do ambiente, o qual gerou a imagem original com sombras não detectáveis pelo método de Otsu e baixa detecção no método de K-means enquanto o método de Gong obteve melhores resultados na detecção porém re-iluminou tanto que saturou a imagem.

O *data set 2* utilizou iluminação artificial e foi inserido uma fonte de iluminação em direção contrária à luz direta, com temperatura de cor de $6500K$ considerada luz fria. O método de Otsu detectou 36% das regiões de sombra da imagem, apesar da baixa detecção é possível notar que a iluminação da sombra melhorou a detecção pelo método de otsu. O método de Gong obteve melhores resultados na detecção porém re-iluminou tanto a imagem que saturou a imagem.

Os *data sets 3, 4 e 5* foram gerados com luz natural, a detecção dos métodos de k-means e Otsu obtiveram melhores resultados comparados com os *data sets 1 e 2*. Na avaliação da re-iluminação foram obtidos valores negativos de SSIM devido a imagem ideal ser iluminada pela sombra de uma nuvem, que influenciou na temperatura de cor da iluminação. A sombra tem temperatura de cor fria tal como a iluminação em um dia nublado.

Comparando visualmente os *Data sets 4 e 5* apresentam uma grande semelhança porém, os resultados na detecção de sombra foram diferentes. Visto que as imagens originais com sombra foram adquiridas da mesma forma com intervalo de tempo de alguns minutos, a diferença está relacionada à temperatura de cor da iluminação no ambiente.

Quanto aos métodos avaliados:

O método de Gong apresentou uma detecção de sombra e uma re-iluminação excessiva, porém por ser um método iterativo onde o usuário define o que é região de sombra e região iluminada, um excesso de re-iluminação (saturação da área iluminada) não representa problema.

O método de K-means podemos notar que na iluminação artificial, a detecção de sombras próprias dos prédios foi detectada e na iluminação natural não foi detectada.

O método de Otsu mostrou um bom desempenho em imagens com iluminação natural e baixo desempenho em imagens de iluminação artificial, mostrando que fora desenvolvido especificamente para imagens aéreas.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros sugere-se testar a aquisição de imagens aéreas com drones que se posicionem em voo no exato lugar em diversas horas do dia para gerar novos *data sets*.

Referências

- ADELIN, K. R. M. et al. Shadow detection in very high spatial resolution aerial images: A comparative study. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 80, p. 21–38, 2013. ISSN 09242716. 18
- AL-NAJDAWI, N. et al. A survey of cast shadow detection algorithms. *Pattern Recognition Letters*, Elsevier B.V., v. 33, n. 6, p. 752–764, 2012. ISSN 01678655. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.patrec.2011.12.013>>. 18
- AZEVEDO, D. F. G. *Automated Imaging Dark Adaptometry in Human Retina*. Tese (Doutorado) — Faculty of the University of Miami, August 1996. 26
- BLASCH, E. et al. Summary of methods in wide-area motion imagery (wami). In: *SPIE, Conf. on Defense Security+Sensing*. [S.l.: s.n.], 2014. 5, 6, 17, 22
- BRUNET, D.; VRSCAY, E. R.; WANG, Z. On the mathematical properties of the structural similarity index. *IEEE Transactions on Image Processing*, IEEE, v. 21, n. 4, p. 1488–1499, 2012. 27
- FAWCETT, T. An introduction to roc analysis. *Pattern Recogn. Lett.*, Elsevier Science Inc., New York, NY, USA, v. 27, n. 8, p. 861–874, jun. 2006. ISSN 0167-8655. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.patrec.2005.10.010>>. 34
- FINLAYSON, G.; FREDEMBACH, C.; DREW, M. S. Detecting illumination in images. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*. IEEE, 2007. p. 1–8. ISBN 1550-5499 978-1-4244-1630-1. ISSN 1550-5499. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4409089>>. 18
- GONG, H.; COSKER, D. Interactive removal and ground truth for difficult shadow scenes. *Journal of the Optical Society of America A*, v. 33, n. 9, p. 1798, 2016. ISSN 1084-7529. Disponível em: <<https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=josaa-33-9-1798>>. 34
- GUO, R.; DAI, Q.; HOIEM, D. Paired Regions for Shadow Detection and Removal. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, IEEE, v. 35, n. 12, p. 2956–2967, dec 2013. ISSN 0162-8828. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6319317>>. 18
- GUO, X.; HOUSER, K. W. A review of colour rendering indices and their application to commercial light sources. *Lighting Research & Technology*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 36, n. 3, p. 183–197, 2004. 24
- HONKAVAARA, E. et al. Digital Airborne Photogrammetry—A New Tool for Quantitative Remote Sensing?—A State-of-the-Art Review On Radiometric Aspects of Digital Photogrammetric Images. *Remote Sensing*, v. 1, n. 3, p. 577–605, 2009. ISSN 20724292. 20
- HORE, A.; ZIOU, D. Image quality metrics: Psnr vs. ssim. In: IEEE. *Pattern recognition (icpr), 2010 20th international conference on*. [S.l.], 2010. p. 2366–2369. 27

- IMPERX. *Imperx b6640 Camera Datasheet*. 2017. Available at: <<http://www.imperx.com/ccd-cameras/b6640/>>. Accessed: 2017-01-10. 22, 29
- JIANG, A. S. X.; WYATT, J. Shadow detection based on colour segmentation and estimated illumination. In: *Proceedings of the British Machine Vision Conference*. [S.l.]: BMVA Press, 2011. p. 87.1–87.11. ISBN 1-901725-43-X. 18
- JOSHI, A.; PAPANIKOLOPOULOS, N. Learning to Detect Moving Shadows in Dynamic Environments. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, IEEE, v. 30, n. 11, p. 2055–2063, nov 2008. ISSN 0162-8828. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4540098>>. 18
- KHAN, S. H. et al. Automatic Shadow Detection and Removal from a Single Image. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, IEEE, v. 38, n. 3, p. 431–446, mar 2016. ISSN 0162-8828. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=7172555>>. 18, 23
- KHARE, M.; SRIVASTAVA, R. K.; JEON, M. Shadow detection and removal for moving objects using daubechies complex wavelet transform. *Multimedia Tools and Applications*, Feb 2017. ISSN 1573-7721. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11042-017-4371-0>>. 17
- LALONDE, J.-F.; EFROS, A. A.; NARASIMHAN, S. G. Detecting ground shadows in outdoor consumer photographs. In: *European Conference on Computer Vision*. [S.l.: s.n.], 2010. 18
- LEACHTENAUER, J. C.; DRIGGERS, R. G. *Surveillance and Reconnaissance Imaging Systems: Modeling and Performance Prediction*. 1st. ed. [S.l.]: Artech House, 2001. 30–31 p. ISBN 978-1-58053-132-0. 21
- LIASIS, G.; STAVROU, S. Satellite images analysis for shadow detection and building height estimation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 119, p. 437–450, 2016. ISSN 0924-2716. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924271616301939>>. 18
- LILIENFELD, P. A Blue Sky History. *Optics and Photonics News*, v. 15, n. 6, p. 32–39, jun 2004. ISSN 1047-6938. 24
- LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W. *Remote Sensing and Image Interpretation, 4th ed.* [S.l.]: New York: Wiley, 2000. 34
- LIN, C.-H. et al. Cloud removal from multitemporal satellite images using information cloning. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, IEEE, v. 51, n. 1, p. 232–241, 2013. 26
- MACQUEEN, J. Some methods for classification and analysis of multivariate observations. In: *Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, Volume 1: Statistics*. Berkeley, Calif.: University of California Press, 1967. p. 281–297. Disponível em: <<http://projecteuclid.org/euclid.bsmsp/1200512992>>. 34
- MCCARTNEY, E. J. Optics of the atmosphere: scattering by molecules and particles. *New York, John Wiley and Sons, Inc., 1976. 421 p., 1976.* 24

MUMBY, P. J.; EDWARDS, A. J. Mapping marine environments with ikonos imagery: enhanced spatial resolution can deliver greater thematic accuracy. *Remote sensing of Environment*, Elsevier, v. 82, n. 2, p. 248–257, 2002. 17

NAVE, G. S. U. H. C. *The Color-Sensitive Cones*. 2012. Available at: <<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/vision/colcon.html>>. Accessed: 2017-01-10. 7, 26

NIKON. *Nikon D3400 Product Manual*. 2018. Accessed: 2018-02-10. 29

Oriel Instruments. *Comparisons of IV Curves between Xenon Lamp-Based and LED-Based Solar Simulators*. 2015. Available at: <[https://www.newport.com/medias/sys\\$__\\$master/images/images/hc9/h79/8797051289630/App-Note-56-Comparisons-of-IV-Curves-between-Xenon-Lamp-Based-and-LED-Based-Solar-Simul.pdf](https://www.newport.com/medias/sys$__$master/images/images/hc9/h79/8797051289630/App-Note-56-Comparisons-of-IV-Curves-between-Xenon-Lamp-Based-and-LED-Based-Solar-Simul.pdf)>. Accessed: 2017-01-10. 24

OSRAM. *Haloline Pro datasheet*. 2017. Available at: <https://www.osram.com/appsinfo/pdc>. Accessed: 2017-09-10. 31, 32

OTSU, N. A threshold selection method from gray level histograms. *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern.*, SMC-9, n. 1, p. 62–69, 1979. 33

PAINE, D. P.; KISER, J. D. *Aerial photography and image interpretation*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2003. 20

PAN, B. et al. Shadow detection in remote sensing images based on weighted edge gradient ratio. In: *2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 505–508. ISSN 2153-6996. 17

PANAGOPOULOS, A. et al. Estimating shadows with the bright channel cue. In: _____. *Trends and Topics in Computer Vision: ECCV 2010 Workshops, Heraklion, Crete, Greece, September 10-11, 2010, Revised Selected Papers, Part II*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012. p. 1–12. ISBN 978-3-642-35740-4. 18

POLIDORIO, A. M. et al. Automatic shadow segmentation in aerial color images. In: *Computer Graphics and Image Processing, 2003. SIBGRAPI 2003. XVI Brazilian Symposium on*. [S.l.: s.n.], 2003. p. 270–277. ISSN 1530-1834. 23

PORTER, R.; FRASER, A. M.; HUSH, D. Wide-area motion imagery. *IEEE Signal Processing Magazine*, IEEE, v. 27, n. 5, p. 56–65, 2010. 5, 6, 17

R.ANDREWS. *ASTM G173 spectrum*. 2011. Accessed: 2018-03-16. 25

RONAN, G. P. *EM Spectrum Revised*. 2013. Available at: <[https://commons.wikimedia.org/wiki/File%3AEM\\$__spectrumrevised.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File%3AEM$__spectrumrevised.png)>. [CC BY-SA 3.0 (<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0>)], via Wikimedia Commons. Accessed: 2017-01-10. 25

SALVADOR, E.; CAVALLARO, A.; EBRAHIMI, T. Cast shadow segmentation using invariant color features. *Computer Vision and Image Understanding*, v. 95, n. 2, p. 238–259, 2004. ISSN 10773142. 18, 23

- SILVA, G. F. et al. Near real-time shadow detection and removal in aerial motion imagery application. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2017. ISSN 0924-2716. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924271617302253>>. 18, 33
- THADA, V.; JAGLAN, V. Comparison of jaccard, dice, cosine similarity coefficient to find best fitness value for web retrieved documents using genetic algorithm. *International Journal of Innovations in Engineering and Technology*, v. 2, n. 4, p. 202–205, 2013. 36
- TSAI, V. J. D. A comparative study on shadow compensation of color aerial images in invariant color models. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions*, v. 44, p. 1661–1671, 2006. 23
- WANG, Z. et al. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity. *IEEE transactions on image processing*, IEEE, v. 13, n. 4, p. 600–612, 2004. 27, 28
- YAO, J.; ZHANG, Z. Systematic static shadow detection. *Proc. 17th Int. Conf. Pattern Recognition*, v. 2, p. 76–79, 2004. 35
- YE, Q.; XIE, H.; XU, Q. Removing Shadows From High-resolution Urban Aerial Images Based On Color Constancy . *ISPRS Congress, XXXIX-B3*, n. September, p. 525–530, 2012. 18
- ZALEWSKI, E. F. Radiometry and photometry. *Handbook of optics*, Citeseer, v. 2, p. 24–1, 1995. 25
- ZANETTI, J. et al. Análise crítica da evolução do sistema landsat. *Anais do Seminário Científico da FACIG*, n. 1, 2017. 20
- ZHU, J. et al. Learning to recognize shadows in monochromatic natural images. In: *2010 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. IEEE, 2010. p. 223–230. ISBN 978-1-4244-6984-0. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5540209>>. 18, 23
- ZIGH, E.; KOUNINEF, B.; KADIRI, M. Removing shadows using rgb color space in pairs of optical satellite images. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, v. 45, n. 3, p. 431–441, Jun 2017. ISSN 0974-3006. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s12524-016-0598-x>>. 18



Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul
Pró-Reitoria de Graduação
Av. Ipiranga, 6681 - Prédio 1 - 3º. andar
Porto Alegre - RS - Brasil
Fone: (51) 3320-3500 - Fax: (51) 3339-1564
E-mail: prograd@pucrs.br
Site: www.pucrs.br