

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

CAISSE AMISSE

MODELAGEM 3D DE TELHADOS DE EDIFICAÇÕES SINGULARES A PARTIR DE
IMAGENS UAV PARA ESTIMATIVA DO POTENCIAL FOTOVOLTÁICO E COLETA
DE ÁGUA PLUVIAL

CURITIBA

2016

CAISSE AMISSE

MODELAGEM 3D DE TELHADOS DE EDIFICAÇÕES SINGULARES A PARTIR DE
IMAGENS UAV PARA ESTIMATIVA DO POTENCIAL FOTOVOLTÁICO E COLETA
DE ÁGUA PLUVIAL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências Geodésicas.

Orientador: Prof. Dr. Álvaro Muriel Lima Machado

Co-orientador: Prof. Dr. Jorge António Silva Centeno

CURITIBA

2016

A517m

Amisse, Caisse

Modelagem 3D de telhados de edificações singulares a partir de imagens UAV para estimativa do potencial fotovoltaico e coleta de água pluvial / Caisse Amisse. – Curitiba, 2016.

104 f. ; il. color : 30 cm.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, 2016.

Orientador: Álvaro Muriel Lima Machado – Co-orientador: Jorge Antônio Silva Centeno

Bibliografia: p. 95-104.

1. Água – Captação. 2. Águas Pluviais. 3. Modelagem tridimensional. 4. Geração de energia fotovoltaica. 5. Drone. 6. VisualSFM. I. Universidade Federal do Paraná. II. Machado, Álvaro Muriel Lima. III. Centeno, Jorge Antônio Silva. IV. Título.

CDD: 628.21

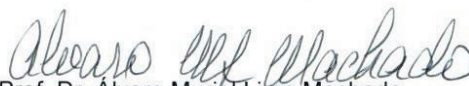
TERMO DE APROVAÇÃO

CAISSE AMISSE

"MODELAGEM 3D DE TELHADOS DE EDIFICAÇÕES SINGULARES A PARTIR DE
IMAGENS UAV PARA ESTIMATIVA DO POTENCIAL FOTOVOLTAICO E COLETA DE
ÁGUA PLUVIAL"

Dissertação nº 299 aprovada como requisito parcial do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

Orientador:



Prof. Dr. Alvaro Muriel Lima Machado
Departamento de Geomática, UFPR



Prof. Dr. Alex Soria Medina
Departamento de Geomática, UFPR



Prof. Dr. Daniel Rodrigues dos Santos
Departamento de Geomática, UFPR

Curitiba, 29 de julho de 2016.

À memória do meu pai,
“*Sheikh Amisse Caisse*”.

AGRADECIMENTOS

A *Allah* todo poderoso;

À minha mãe, os meus irmãos, minhas irmãs, a todos os familiares, o meu profundo agradecimento pelos estímulos em meus estudos e na vida.

À minha família, em especial ao Lucman e Nusrah que sofreram tanto com minha ausência.

Ao meu amigo Ivenso da Silva Vasco Sualehe, pela cumplicidade, apoio e amizade de sempre.

A todas as pessoas com as quais compartilhei essa jornada, àquelas que tiveram influência no meu trabalho direta ou indiretamente, por tudo o que aprendi e vivi.

Ao Professor Doutor Jorge A. Silva Centeno, pela orientação, ensinamentos e pelo pronto auxílio em todas as etapas da pesquisa. Aqui expresso o meu profundo agradecimento.

Ao professor Doutor Álvaro Muriel Lima Machado, agradeço pela orientação, por sua cumplicidade e responsabilidade direta na construção deste Trabalho.

Ao PPGCG pela oportunidade de convivência e aprendizagem e aos Professores do programa, minha eterna gratidão pelo apoio e pelos ensinamentos.

Ao MCT/Banco Mundial, que concedeu uma Bolsa de estudos, possibilitando minha inserção no Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésico-UFPR.

À Universidade Pedagógica, pelo estímulo enquanto quadro da instituição.

Externo igualmente os meus agradecimentos ao Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC-UFPR), pela cessão de levantamento efetuado por sistema LiDAR (OPTTECH/INS GPS APPLANIX), recurso indispensável, na execução do presente trabalho.

RESUMO

Neste trabalho é apresentada uma metodologia para modelagem 3D de telhados de edifícios a partir de aeroimagens UAV para estimativa do potencial fotovoltaico e coleta de água de chuva. A abordagem proposta usa câmeras a bordo de plataformas UAV de baixo custo para aerofilmagens. O processamento das aeroimagens é realizado no VisualSFM, o qual usa algoritmos SfM para geração da nuvem de pontos. A modelagem dos planos do telhado é feita com base na relação espacial entre pontos vizinhos da nuvem de pontos SfM. Do modelo gerado, é extraída a informação geométrica do telhado (área, inclinação e orientação). A informação geométrica do telhado medida na nuvem de pontos SfM é comparada com as medidas de referência da nuvem de pontos LiDAR da mesma cena, tendo sido verificado que a precisão percentual é da ordem dos 6%. A principal vantagem do método é que o resultado é facilmente alcançado por meio da combinação de tecnologias de baixo custo para aquisição e processamento de dados, tornando a metodologia facilmente reproduzível.

Palavras-Chave: Modelagem 3D, nuvem de pontos, UAV, VisualSFM, Potencial fotovoltaico; água da chuva

ABSTRACT

This work presents a methodology for 3D building roofs modelling from optical images to estimate the photovoltaic potential and rainwater harvesting. The proposed approach uses cameras on board of low cost UAV platforms for aerial filming. The aerial images processing is performed in VisualSfM, which uses SfM algorithms to generate the point clouds. The modelling of the roof plans is performed based on the spatial relationship between the SfM point cloud neighbouring points. From the generated model, the roof geometric information is extracted (area, slope and orientation). The roof geometric information measured in the SfM point cloud is then compared with the reference measurements of the LiDAR point clouds in the same scenario, having been verified a precision of 6%. The main advantage of this method is that the result is easily achieved through the combination of low cost technologies for acquisition and data processing, making the methodology easily reproducible.

Keywords: 3D modeling, point cloud, UAV, VisualSfM, photovoltaic potential; rainwater.

LISTA DE SIGLAS E NOMENCLATURAS

1D	Unidimensional
2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
BA	Bundle adjustment
CCD	Charge-Coupled Device
CMOS	Complementary Metal Oxide Silicon
CMVS	Clustering Views for Multi-View Stereo
CPU	Central Processing Unit
DoG	Difference of Gaussians
EXIF	Exchangeable Image File Format
FPV	First Person View
GPS	Global Positioning System
GPU	Graphics Processing Unit
GSD	Ground Sample Distance
GUI	Graphical User Interface
IMU	Inertial Measurement Unit
LiDAR	Light Detection And Ranging
Matlab	MATrix LABoratory
PBA	Parallel Bundle Adjustment
PMVS	Patch Multi-View Stereo
PMVS2	Patch-based Multi-View Stereo version 2
SfM	Structure from motion
SIFT	Scale Invariante Feature Transform
UAS	Unmanned Aerial System
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1: (a) ILUSTRAÇÃO DO MODELO DE CÂMERA PINHOLE. (b) VISTA LATERAL DO MODELO DE CÂMERA PINHOLE. AS COORDENADAS DO PONTO x SÃO CALCULADAS POR SEMELHANÇA DE TRIÂNGULOS.	24
FIGURA 2.2: SISTEMA DE COORDENADAS DO PLANO DE IMAGEM (x, y) E DA CÂMERA (x_{cam}, y_{cam})	25
FIGURA 2.3: TRANSFORMAÇÃO EUCLIDIANA ENTRE UM SISTEMA DE COORDENADAS OBJETO (TERRENO) FIXO COM ORIGEM EM O E EIXOS (X, Y, Z) E UM SISTEMA DE COORDENADAS CENTRADO NA CÂMERA DADO PELOS EIXOS $(X_{cam}, Y_{cam}, Z_{cam})$ ATRAVÉS DE UMA ROTAÇÃO R E TRANSLAÇÃO t	26
FIGURA 2.4: PRINCIPAIS ELEMENTOS DA GEOMETRIA EPIPOLAR.	29
FIGURA 2.5: (a) PARTE DO ESPAÇO-ESCALA CONSTRUÍDA PELO DETECTOR SIFT. (b) DETECÇÃO DE EXTREMOS NO ESPAÇO-ESCALA.....	37
FIGURA 2.6: (a) HISTOGRAMA DE ORIENTAÇÕES DE UM PONTO-CHAVE. (b) ILUSTRAÇÃO DE FEATURES SIFT COM ESCALAS E ORIENTAÇÕES, DETECTADAS EM UMA IMAGEM.	40
FIGURA 2.7: CONSTRUÇÃO DO DESCRITOR PARA UM PONTO-CHAVE DE 2X2 COM 48 ELEMENTOS.....	41
FIGURA 2.8: TRIANGULAÇÃO DE DELAUNAY E DIAGRAMA DE VORONOI. REPRESENTAÇÃO DA DUALIDADE ENTRE AMBOS.....	45
FIGURA 2.9: SISTEMA DE COORDENADAS CELESTES.....	46
FIGURA 2.10: DIREÇÃO DE INCIDÊNCIA DE FEIXE DE RADIAÇÃO SOLAR PARA A TERRA DURANTE OS EQUINÓCIOS COM $\delta = 0^\circ$, NO SOLSTÍCIO DE JUNHO COM $\delta = +23,45^\circ$ E NO SOLSTÍCIO DE DEZEMBRO COM $\delta = -23,45^\circ$	47
FIGURA 2.11: POSIÇÃO DO SOL NO CÉU EM RELAÇÃO AOS ÂNGULOS SOLARES.	49
FIGURA 2.12: ORIENTAÇÃO ÓPTIMA DOS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS FIXOS INSTALADOS EM DIFERENTES LATITUDES.	50
FIGURA 2.13: MAPA DE IRRADIAÇÃO GLOBAL-MÉDIA DIÁRIA ANUAL EM wh/m^2 dia.	51

FIGURA 2.14: DISTRIBUIÇÃO DA MÉDIA DE IRRADIAÇÃO GLOBAL POR REGIÕES DO BRASIL.....	52
FIGURA 2.15: IRRADIAÇÃO MÉDIA MENSAL E VARIABILIDADE DA IRRADIAÇÃO MÉDIA DIÁRIA PARA TODO O TERRITÓRIO BRASILEIRO.....	52
FIGURA 2.16: VARIAÇÃO SAZONAL DA PRECIPITAÇÃO NA REGIÃO DE ESTUDO, BASEADA NA MÉDIA DOS DADOS DA SÉRIE METEOROLÓGICA COMPREENDIDA ENTRE 1931-2015. INMET, CURITIBA-PR.....	55
FIGURA 2.17: TOTAL ANUAL DOS VALORES DE PRECIPITAÇÃO NA REGIÃO DE ESTUDO, BASEADOS NA MÉDIA DOS DADOS DA SÉRIE METEOROLÓGICA COMPREENDIDA ENTRE 1931-2015. INMET, CURITIBA-PR.....	56
FIGURA 3.1: LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO, COM AMPLIAÇÃO DAS EDIFICAÇÕES LEVANTADAS.	57
FIGURA 3.2: QUADRICÓPTERO DJI PHANTOM 2 ALIMENTADO POR BATERIA ELECTRÓNICA. FABRICADO PELA DJI INNOVATIONS, É CAPAZ DE TRANSPORTAR UMA CARGA DE 300 g.....	58
FIGURA 3.3: A ESQUERDA, OBJETO REPRESENTADO POR NUVEM DE PONTO ESPARSA; A DIREITA, A MESMA CENA REPRESENTADA COMO NUVEM DE PONTOS DENSA COM POSIÇÕES DA CÂMERA.....	68
FIGURA 3.4: ROTEIRO METODOLÓGICO DA PESQUISA.....	69
FIGURA 3.5: ILUSTRAÇÃO DA EXTRAÇÃO DOS PLANOS. (a) ÂNGULO ENTRE TRIÂNGULOS ADJACENTES (b) TRIÂNGULOS COM VETORES NORMAIS E (c) RESULTADO DO CRESCIMENTO DE REGIÃO POR TRIÂNGULO.	71
FIGURA 3.6: VISTA SUPERIOR DO TELHADO DE EDIFÍCIO DE 4 "ÁGUAS"	72
FIGURA 3.7: VETOR NORMAL A UM PLANO	75
FIGURA 3.8: DETERMINAÇÃO (a) DO QUADRANTE A PARTIR DOS COMPONENTES DO VETOR NORMAL AO PLANO. (b) ORIENTAÇÃO ABSOLUTA DO TELHADO, DENOTADA COMO "Or", A PARTIR DO ÂNGULO ENTRE A PROJEÇÃO DO VETOR NO PLANO HORIZONTAL E O EIXO Y.	76
FIGURA 3.9: ÂNGULO DE INCLINAÇÃO A PARTIR DOS VALORES DO VETOR NORMAL DO PLANO.	76
FIGURA 4. 1: (a) e (b) NUVEM DE PONTOS COM AS POSES DA CÂMERA PARA OS EXPERIMENTOS 1 E 2 RESPECTIVAMENTE.....	81
FIGURA 4.2: NUVENS DE PONTOS RECORTADAS PARA O EXPERIMENTOS 1 (a) E 2 (b).....	82

FIGURA 4.3: MODELO DO TELHADO MOSTRANDO O AGRUPAMENTO DOS TRIÂNGULOS PARA OS EXPERIMENTOS 1 (a) E 2 (b).....	84
FIGURA 4.4: NUVEM DE PONTOS 3D SfM COM OS PONTOS ESCOLHIDOS NAS SUPERFÍCIES DO OBJETO PARA OS EXPERIMENTOS 1 (a) e 2 (b).....	85
FIGURA 4.5: PERFIL DE TELHADOS REGISTRADOS ENTRE NUVENS SfM E LIDAR.....	85
FIGURA 4.6: HISTOGRAMA DOS RESÍDUOS	88
FIGURA 4.7: DIMENSÕES DE REFERÊNCIA DOS TELHADOS PARA OS EXPERIMENTOS (a) e (b).	88
FIGURA 4.8: IDENTIFICAÇÃO DAS FACES DOS TELHADOS PARA OS EXPERIMENTOS (a) e (b).	90

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1: ESTIMATIVA DE VALORES DE COEFICIENTE DE ESCOAMENTO C_r	54
TABELA 3.1: PACOTE DE SOFTWARE E INSTRUMENTOS USADOS.....	58
TABELA 3.2: ESPECIFICAÇÃO DO QUADRICÓPTERO UAV DJI PHANTOM 2 ...	59
TABELA 3.3: INFORMAÇÕES SOBRE A CÂMERA E O SENSOR.....	60
TABELA 4.1: PARÂMETROS DA TRANSFORMAÇÃO AFIM 3D.....	86
TABELA 4.2: DISCREPÂNCIAS DE PONTOS DE VERIFICAÇÃO PARA OS PONTOS DA NUVEM LiDAR E SfM.	87
TABELA 4.3: COORDENADAS DOS PONTOS LIDOS NA NUVEM 3D SfM.	89
TABELA 4.4: VALORES DE ÁREA, ORIENTAÇÃO E INCLINAÇÃO DAS SUPERFÍCIES DO TELHADO... ..	91
TABELA 4.5: ESTIMATIVA DA ÁGUA DA CHUVA QUE PODE SER COLETADA ..	91
TABELA 4.6: POTENCIAL DA ENERGIA PRODUZIDA	92

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	18
1.2 CONTRIBUIÇÕES	19
1.3 OBJETIVOS.....	19
1.3.1 Objetivo Geral	19
1.3.2 Objetivos Específicos:	19
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	20
2 REVISÃO DA LITERATURA	21
2.1 TRABALHOS RELACIONADOS.....	21
2.2 VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS (<i>Unmanned Aerial Vehicle - UAV</i>)	22
2.3 MODELO DA CÂMERA	23
2.4 GEOMETRIA EPIPOLAR	27
2.5 ESTIMATIVA DA MATRIZ FUNDAMENTAL	31
2.6 POSE RELATIVA DAS CÂMERAS	31
2.7 ALGORITMOS SfM (<i>Structure from Motion</i>).....	31
2.7.1 VisualSfM.....	31
2.7.2 Structure From Motion.....	32
2.7.3 CMVS (<i>Clustering for Multi-View Stereo</i>)	42
2.7.4 PBA (<i>Parallel Bundle Adjustment</i>).....	43
2.7.5 PMVS2 (<i>Patch Multi-View Stereo</i>).....	43
2.8 USO DA TRIANGULAÇÃO DE DELAUNAY NO TRATAMENTO DE NUVENS DE PONTOS.....	44
2.9 POTENCIAL SOLAR	45
2.9.1 Movimento solar e direcionamento de painéis fotovoltaicos	45
2.9.2. Ângulo de inclinação e orientação do painel fotovoltaico	49
2.9.3. Irradiação solar no Brasil.....	51
2.9.4. Levantamento das características do local de instalação	52
2.10 POTENCIAL DA COLETA DE ÁGUA PLUVIAL	53
2.10.1 Volume aproveitável de água de chuva em telhados com telhas cerâmicas.....	56
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	57
3.1 ÁREA DE ESTUDO	57

3.2 MATERIAIS	58
3.2.1 Equipamentos e Softwares Computacionais.....	58
3.3 METODOLOGIA.....	60
3.3.1 Voos com o quadricóptero DJI PHANTOM 2	60
3.3.2 Planejamento e realização de voos para aquisição de dados.....	62
3.3.3 Processamento de Imagens.....	64
3.3.4 Geração de modelos 3D com base na abordagem SfM.....	69
3.3.5 Modelagem do telhado.....	70
3.3.6 Segmentação dos planos do telhado	72
3.3.7 Avaliação da qualidade dos resultados usando dados lidar derivados	73
3.3.8 Cálculo dos valores da orientação, inclinação e área para cada telhado..	75
3.3.9 Análise geométrica e classificação.....	77
3.3.10 Estimativa da radiação solar	78
4 RESULTADOS E DISCUSÃO	80
4.1 PLANEJAMENTO DE VOOS E AQUISIÇÃO DE DADOS.....	80
4.2 GERAÇÃO DA NUVEM DE PONTOS COM BASE NA ABORDAGEM SfM....	81
4.3 RECONSTRUÇÃO DAS FACES DO TELHADO	83
4.4 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA NUVEM DE PONTOS	84
4.4.1 Registo entre nuvens de pontos SfM e LiDAR	84
4.4.2 Cálculo das dimensões das arestas na nuvem de pontos SfM	88
4.5 CÁLCULO DE INCLINAÇÃO E ÁREA.....	90
4.6 ESTIMATIVAS DO POTENCIAL SOLAR E HIDRICO	91
5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	93
REFERÊNCIAS.....	96

1 INTRODUÇÃO

A demanda por água potável e energia é um tópico desafiador considerando que estes recursos são finitos, e que há limites em seu uso. Diante do atual quadro de escassez da água potável e irregularidades de chuvas no Brasil, o aproveitamento de telhados para coleta de água pluvial e instalação de painéis fotovoltaicos torna-se uma prática cada vez mais comum e alternativa economicamente interessante, já que tanto a água como a energia são recursos dotados de valor econômico e sua cobrança deve ser utilizada para racionalização do seu uso e financiamento de atividades de sua recuperação e gestão.

Conhecendo a distribuição espacial das potenciais áreas de telhados é possível estimar a quantidade da água pluvial coletável e o potencial de produção fotovoltaica contribuindo desse modo no melhoramento e efetivação de parte das políticas energéticas e de aproveitamento de água de chuva de forma mais racional com vantagens econômicas e ganhos ambientais.

Assim, para identificação, avaliação, análise e apuração da disposição espacial dos telhados têm sido usadas uma série de ferramentas computacionais. Dentre estas, o SIG (Sistema de Informação Geográfica) é uma das mais difundidas. Como exemplo, os cadastros solares disponíveis na web de algumas cidades como Nova York, Boston, Bolzano, Morgex, demonstram que estas ferramentas já estão consolidadas (AGUGIARO *et al.*, 2012; BORFECCHIA *et al.*, 2013; NEX *et al.*, 2013). No entanto, são limitados na análise do nível de detalhe porque não avaliam a verdadeira superfície disponível e a possível presença de obstáculos nos telhados. Esta deficiência está ligada ao fato de que estas ferramentas consideram vastas áreas e exploram, em alguns casos, informações não mais adequadas (CHIABRANDO *et al.*, 2015). Mesmo quando a informação LiDAR está disponível, muitas vezes esta não permite extrair representação tridimensional densa, uma vez que geralmente a resolução utilizada é demasiada baixa para adquirir todos os detalhes necessários (BONESSO *et al.*, 2013; BORFECCHIA *et al.*, 2013). Por exemplo, a densidade máxima da nuvem de pontos para uma escala de 1:2000 é geralmente 1 ponto a cada 0,80m, o que não é suficiente para capturar todos os detalhes úteis.

Outros métodos mais comuns concebidos para este propósito tem sido o uso de uma série de imagens aéreas, LiDAR aerotransportado e topografia convencional. Alguns deles, porém, esbarram em dificuldades ou limitações locais e operacionais. Comprar um levantamento aéreo ou de LiDAR aerotransportado de uma construção é uma opção muito cara. Repetir um levantamento LiDAR em uma dada área para alcançar uma resolução temporal adequada não é, portanto, uma opção para muitos usuários de dados LiDAR (HUMMEL, *et al.* 2011). A topografia seria uma opção viável em muitos casos, mas pode encontrar dificuldades em função do espaço físico limitado em volta de uma construção alta, além de não ser possível obter dados de pontos localizados no topo do teto.

Neste contexto, a utilização de UAVs (*Unmanned Aerial Vehicles*), e especialmente a classe dos micro e mini-UAVs com menos de 5 Kg de peso, constitui uma oportunidade excitante para desempenhar esta tarefa, principalmente quando se trata de projetos de pequena escala. As principais vantagens dos UAVs comparativamente aos meios aéreos clássicos pesados incluem: custos de operação mais reduzidos, maior rapidez de utilização, possibilidade de atuação com nuvens, grande facilidade de manuseamento, possibilidade de operação em espaços condicionados.

Por outro lado, o processamento de aeroimagens captadas a partir de câmeras a bordo de UAVs, usando softwares SfM (livres), permite ao usuário adaptar o processamento para necessidades específicas e, se necessário, facilmente corrigir, alterar ou melhorar o modelo gerado, com alta taxa de automação do processo.

Neste sentido, este trabalho apresenta uma proposta metodológica de estudo que testa a viabilidade de processar aeroimagens captadas através de câmeras a bordo de UAV (DJI Phantom 2) para geração da nuvem de pontos usando abordagem SfM, e em seguida modelagem 3D de telhados que são analisadas para duas aplicações práticas: a estimativa do potencial da coleta de água pluvial e produção da energia fotovoltaica. Esta proposta metodológica se mostra como uma solução rápida para modelagem 3D de edifícios ou estruturas de interesse em casos em que por várias razões o uso de LiDAR ou de outras formas de imageamento se mostra impraticável.

1.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O potencial de reconstrução usando imagens capturadas por câmeras aerotransportadas em veículos aéreos não tripulados (UAVs) foi demonstrado em (HIRSCHMULLER, 2008), (VU *et al.*, 2009), (HAALA; ROTHERMEL, 2012). A baixa altitude e velocidade com que os UAVs operam, permitem a coleta de dados com detalhe proporcionando observações com redundância. No entanto, estas plataformas (particularmente os micro UAVs) são instáveis e captam imagens de grandes diferenças rotacionais e pobre qualidade de observação direcional. Processar essas imagens é mais desafiador do que processar imagens coletadas por sistemas robustos (ROSNELL; HONKAVAARA, 2012).

Este trabalho procura reconstruir modelos 3D dos telhados de edifício, partindo da captura de imagens do topo de um edifício, geração da nuvem de pontos 3D SfM, reconstrução e recuperação dos modelos dos telhados e avaliação para aplicações de estimativa de coleta da água pluvial e ou instalação de painéis fotovoltaicos. A solução apresentada procura responder à questão: Será possível realizar reconstrução 3D de telhados de edifício a partir da nuvem de pontos SfM resultante do processamento de aeroimagens UAV, para a extração de parâmetros geométricos usados como entrada no cálculo de potencial fotovoltaico e coleta de água de chuva?

Os principais desafios são: a modelagem 3D usando nuvem de pontos SfM gerada a partir de aeroimagens tomadas por câmeras digitais a bordo de um UAV, e identificação dos vários componentes que pertencem aos objetos 3D a ser reconstruído. Os telhados modelados, bem como a sua informação geométrica é testada para duas aplicações práticas: estimativa do potencial solar e hídrico.

A abordagem sugerida no presente trabalho assenta na hipótese de que se a coleta de imagens com alta superposição a partir de um veículo aéreo não tripulado é viável de modo que estas imagens possam ser usadas para derivar informação da geometria do telhado com a suficiente qualidade para servir de entrada em modelos de estimativa de potencial fotovoltaico e de coleta de água da chuva, então, será viável também a Modelagem 3D de telhados a partir da nuvem de pontos SfM gerada a partir de aeroimagens obtidas por câmeras a bordo de UAVs. Para verificar

a hipótese, o resultado é comparado recorrendo aos modelos 3D das mesmas cenas obtidos com dados LiDAR aerotransportado e verdade do campo.

1.2 CONTRIBUIÇÕES

A principal contribuição deste trabalho é a proposta de uma metodologia de modelagem 3D de edifícios (ou estruturas isoladas) a partir da nuvem de pontos SfM resultante de processamento de aeroimagens adquiridas através de câmeras de baixo custo a bordo de UAV. Após modelagem, identificação e análise da geometria dos diferentes segmentos, é avaliada a viabilidade de seu uso para instalação de painéis solares para produção fotovoltaica e colheita de água pluvial. Propor metodologia de modelagem 3D usando nuvem de pontos SfM como uma ferramenta útil para tomada de decisões na implantação de painéis solares para produção fotovoltaica e coleta de água de chuva em telhados, mas também se mostra como um meio alternativo aos mecanismos convencionais de (aero) levantamento. Na essência, a nossa abordagem procura preencher uma lacuna na literatura relativa à aplicação de nuvens de pontos SfM geradas a partir de aeroimagens UAV como uma potencial solução rápida, uma alternativa econômica aos métodos LiDAR para extração de informação geométrica usada como entrada na estimativa do potencial fotovoltaico e pluvial para cenas de pequena escala.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Avaliar a viabilidade do uso de fotografias captadas por câmeras a bordo de UAVs na obtenção de informação geométrica para a estimativa do potencial hídrico e fotovoltaico em telhados de residências singulares, através da modelagem de nuvem de pontos.

1.3.2 Objetivos Específicos:

- Pesquisar as características do planejamento do voo para a modelagem de telhados com UAV;
- Gerar nuvens de pontos com base na abordagem *Structure From Motion*;

- Avaliar a qualidade dos resultados usando dados LiDAR derivados;
- Modelar as diferentes faces do telhado e extrair informação geométrica, definindo sua área, orientação e inclinação dos telhados;
- Calcular o índice de insolação para a área do telhado e analisar o potencial de geração de energia;
- Calcular o potencial de captura de água de chuva.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O Trabalho está organizado em cinco capítulos. O primeiro capítulo fornece uma introdução do conteúdo abordado na pesquisa, a justificativa do trabalho, bem como os objetivos: geral e específicos.

O capítulo 2 apresenta a revisão da literatura, onde primeiro se faz uma síntese dos trabalhos relacionados a esta pesquisa, em seguida são abordados tópicos como: plataformas UAV, modelo da câmera, conceitos fundamentais atinentes à reconstrução 3D e os softwares empregados. Principal enfoque dá-se ao pacote VisualSfM, ao SIFT e a modelagem pela triangulação de Delaunay. Ainda no capítulo 2, aborda-se o potencial solar e hídrico bem como as especificidades da geometria de telhados para instalação de painéis solares e coleta de água de chuva.

No capítulo 3 são descritos os materiais utilizados, suas características técnicas e a área de estudo. Ainda nesse capítulo são apresentadas as etapas da metodologia envolvidas no processo da modelagem 3D, abarcando desde o planejamento de voo à estimativa do potencial solar e hídrico.

O capítulo 4 apresenta a discussão e os resultados obtidos. Esses resultados englobam o planejamento de voo para as aerofilmagens com UAV. A geração da nuvem de pontos SfM; o registro pelo modelo afim 3D; a modelagem 3D; o cálculo da área, inclinação e orientação do telhado e a avaliação da qualidade do modelo 3D da nuvem SfM via comparação com a nuvem de pontos LiDAR.

Finalizando, tem-se o capítulo 5 onde são apresentadas as principais conclusões obtidas a partir dos resultados gerados. As sugestões para trabalhos futuros estão igualmente arroladas neste capítulo.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 TRABALHOS RELACIONADOS

A modelagem usando nuvem de pontos 3D LiDAR para a seleção de áreas de telhados adequadas para a instalação de painéis solares e coleta de água da chuva tem sido realizada em diferentes trabalhos por grupos de pesquisa. É apresentada a seguir uma síntese dos principais trabalhos que estão mais relacionados com a presente pesquisa.

Joachim *et al.* (2009) detectam planos de telhado na nuvem de pontos 3D de dados LiDAR e calculam orientação, inclinação e a área de cada faceta do telhado. Em seguida, a análise de potencial solar é realizada para cada plano do telhado usando informações extraídas da nuvem de pontos 3D.

Conway e Lim (2010) extraem áreas de telhados na nuvem de pontos 3D de dados LiDAR aerotransportado. Imagens aéreas são agregadas na análise para melhorar a acurácia dos dados. Os resultados das medições da área são aplicados nas equações de modelagem para calcular a quantidade de água da chuva a ser coletada e a energia solar que podem ser produzidos durante um ano.

López-Fernández *et al.* (2015) propõem e testam uma metodologia capaz de detectar e classificar automaticamente superfícies de telhados em relação à sua adequação para abrigar painéis solares. A metodologia consiste no processamento de imagens de câmaras RGB e termográficas para a geração de nuvens de pontos 3D de telhados. As imagens são adquiridas a partir de um triciclo aéreo de baixo custo equipado com uma plataforma de multissensores. A nuvem de pontos 3D densa é georreferenciada permitindo uma análise precisa da orientação e inclinação dos telhados. A informação térmica propiciou o conhecimento direto sobre a diferença de temperatura relativa entre os telhados e, conseqüentemente, a seleção de superfícies que apresentam condições geométricas ideais para instalar painéis solares.

2.2 VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS (*Unmanned Aerial Vehicle* - UAV)

Os UAVs, tal como o próprio nome sugere, são veículos aéreos não tripulados que podem ser remotamente controlados ou completamente autônomos ou ainda uma combinação de ambos (VAN BLYENBURGH, 1999). Em língua portuguesa é muitas vezes utilizado o acrónimo “VANT”. Adotaremos, no entanto a terminologia internacional mais comum, UAV, apesar de, mais recentemente (e quiçá mais correto) ter surgido o termo “UAS”, de *Unmanned Aircraft System*, porque se refere a todo o sistema em jogo: UAV + Estação de Controle Terrestre.

A nomenclatura de “sistema” alarga o conceito tradicional de veículo não tripulado (UAV) para além da plataforma aérea, abarcando também a estação remota, operadores, e processos de comando e controle. Em alternativa ao termo UAS adotado pelo Departamento de Defesa dos EUA (*US Department of Defense* - DoD) e a Autoridade de Aviação Civil do Reino Unido (*Civil Aviation Authority of the UK* - CAA), a USAF (*United States Air Force*) e a ICAO (*International Civil Aviation Organization*) preferem o termo “aeronave pilotada por controle remoto (*Remotely Piloted Aircraft* – RPA)”. O termo “controle remoto” pretende capturar duas vertentes importantes: o fato de que existe um piloto da aeronave e por outro lado, que o sistema continua a estar fortemente dependente de pessoal. A denominação RPA é motivada basicamente pelo fato de que apenas RPAS (*Remotely Piloted Aircraft Systems*) são capazes de se integrar no sistema de aviação civil internacional (COLOMINA; MOLINA, 2014).

Eisenbeiss, (2009) relata como sendo as maiores vantagens dos UAVs comparativamente aos sistemas tripulados, o fato de os UAVs poderem voar em zonas normalmente inacessíveis, tais como áreas montanhosas, áreas vulcânicas, regiões sísmicas, áreas desérticas, áreas sob inundações, zonas de acidentes e zonas de incêndios ou ainda a maior disponibilidade de utilização destes aparelhos. Porque realizam voos normalmente a uma altitude inferior à altitude a que normalmente voam os aviões tripulados poderão, em muitos casos, voar abaixo das nuvens, conseguindo assim cumprir a sua missão. Por outro lado, não sendo tripulados, têm custos de aquisição e operação bastantes mais reduzidos. Incidindo o nosso estudo sobre a classe dos micros/mini UAVs, que não ultrapassa os 5 kg (EISENBEISS, 2009), as maiores desvantagens estão relacionadas com a baixa capacidade de carga destes aparelhos, que obriga à escolha de sensores

fotogramétricos, de posicionamento e orientação pequenos e leves e necessariamente de menor qualidade, embora sejam também de menor custo. Outra desvantagem relacionada com o baixo peso dos aparelhos é a extrema dependência das condições atmosféricas, nomeadamente do vento e da chuva. Por último, deve-se registar também problemas de comunicação por rádio entre o aparelho e a estação terrestre de controle, comunicação esta essencial para a aquisição de dados de orientação e posicionamento.

Mesmo assim, Eisenbeiss, 2009 é categórico ao afirmar que plataformas UAVs são uma nova ferramenta de medição fotogramétrica que abre novas aplicações com alcances em vários domínios, combinando fotogrametria aérea e terrestre e introduzindo novas aplicações em tempo real e alternativas de baixo custo para a fotogrametria clássica aérea com veículos tripulados. Daí justificar-se a sua utilização na agricultura de precisão (JORGE *et al.*, 2011), monitoramentos de impactos ambientais (LONGHITANO, 2010), deslocamento de terra, mapeamento e geração de modelo 3D de minas a céu aberto (ZISCHINSKY *et al.*, 2000), cadastro urbano e sensoriamento remoto (EVERAERTS, 2008; EISENBEISS, 2009 e 2011; LALIBERTE *et al.*, 2011; TURNER *et al.*, 2012; KHAN *et al.*, 2012).

Uma revisão mais detalhada e atualizada sobre as plataformas UAVs pode ser encontrada nos trabalhos de (COLOMINA; MOLINA, 2014; VAN BLYENBURGH, 2013; EISENBEISS, 2009).

2.3 MODELO DA CÂMERA

Uma câmara tem como objetivo principal realizar o mapeamento entre pontos do terreno (espaço-objeto) (R^3) e pontos da imagem (espaço-imagem) (R^2) (HARTLEY; ZISSERMAN, 2000). Este mapeamento é definido por um modelo matemático da câmara, que descreve o método de aquisição de imagem conhecido como modelo de câmara pinhole. Este modelo de câmara define um mapeamento geométrico no ponto 3D para o plano da imagem 2D usando como referência um centro de projeção, conhecido como projeção perspectiva (HARTLEY; ZISSERMAN 2004, TRUCCO; VERRI, 1998).

A Figura. 2.1a ilustra o modelo da câmara *pinhole* onde o ponto C é dito *Centro da Câmera* e o ponto P como Ponto Principal que é o ponto de intersecção entre o

eixo principal e o plano da imagem (ou plano focal, $Z = f$). A distância entre o centro da câmera e o plano focal é igual a f (distância focal) (Figura 2.1b).

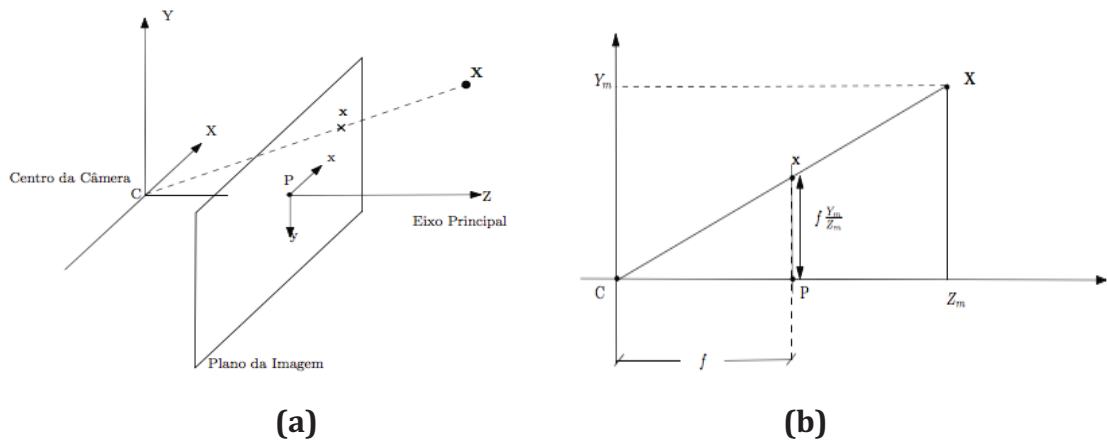


FIGURA 2.1: (a) ILUSTRAÇÃO DO MODELO DE CÂMERA PINHOLE. (b) VISTA LATERAL DO MODELO DE CÂMERA PINHOLE. AS COORDENADAS DO PONTO x SÃO CALCULADAS POR SEMELHANÇA DE TRIÂNGULOS.

ADAPTADO DE HARTLEY; ZISSERMAN, (2004).

Denotando um ponto no espaço R^3 como $X = [X_m, Y_m, Z_m]^T$, definido em relação aos eixos de coordenadas $[C, X, Y]^T$ e o ponto da imagem $x = [x_i, y_i]^T$ definido nos eixos de coordenadas $[P, x, y]^T$ (FIGURA 2.1a), procura-se a relação ξ ($R^3 \rightarrow R^2$) tal que:

$$\begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \end{bmatrix} \xrightarrow{\xi} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} \quad [2.1]$$

Desta transformação, são explicitados dois tipos de parâmetros: os parâmetros extrínsecos, tais como rotação e translação do eixo $[P, x, y]^T$ em relação à $[C, X, Y, Z]^T$, e os parâmetros intrínsecos como, centro óptico, entre outros.

Pode-se escrever facilmente, através da análise da Figura. 2.1b, que a matriz de projeção do ponto central da câmera, em coordenadas homogêneas, é:

$$\begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \\ 1 \end{bmatrix} \xrightarrow{P} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \\ 1 \end{bmatrix} \quad [2.2]$$

A expressão (2.1) assume de que a origem das coordenadas do plano de imagem está no ponto principal. Na prática, pode acontecer que o ponto central P da câmera não esteja localizado sobre o eixo Z (FIGURA. 2.2), daí que, em geral, existe o seguinte mapeamento:

$$[X_m, Y_m, Z_m]^T \rightarrow \left[f \frac{X_m}{Z_m} + p_x, f \frac{Y_m}{Z_m} + p_y \right]^T \quad [2.3]$$

Neste caso, o ponto principal P é expresso por $P = [p_x, p_y]^T$ e a transformação é dada por:

$$\begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \\ 1 \end{bmatrix} \xrightarrow{P} \begin{bmatrix} x_i + p_x \\ y_i + p_y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \\ 1 \end{bmatrix} \quad [2.4]$$

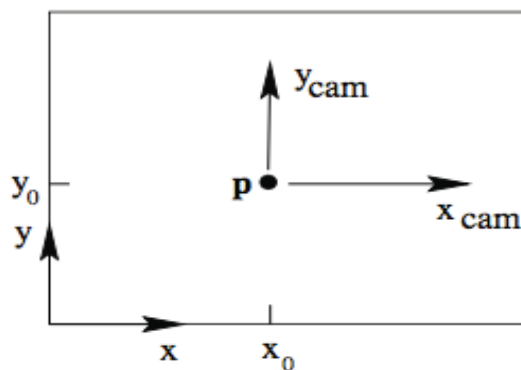


FIGURA 2.2: SISTEMA DE COORDENADAS DO PLANO DE IMAGEM (x, y) E DA CÂMERA (x_{cam}, y_{cam})

ADAPTADO DE HARTLEY; ZISSERMAN, (2004).

De forma abreviada: $x = K [I | 0] X_{cam}$ [2.5]

Onde K é matriz de parâmetros intrínsecos, dada por:

$$K = \begin{bmatrix} f & 0 & p_x \\ 0 & f & p_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad [2.6]$$

A matriz K , denominada de *matriz de calibração* ou *matriz de parâmetros intrínsecos*, parametriza as propriedades internas de uma câmera. A matriz de parâmetros intrínsecos é a matriz que efetivamente multiplica coordenadas de pontos 3D expressos em um referencial centrado na câmera em coordenadas 2D em uma imagem digital *CCD (Charge-Coupled Device)* ou *CMOS (Complementary Metal Oxide Silicon)* (HARTLEY; ZISSERMAN, 2004).

Na equação (2.5), $X_{cam} = [X_m, Y_m, Z_m]^T$ são as coordenadas do *frame* da câmera.

No caso em que um ponto do espaço objeto (terreno) X é descrito tomando como referência outro sistema de coordenadas, pode-se aplicar uma transformação de rotação R e translação t ao ponto para expressá-lo no referencial da câmera. As grandezas R e t caracterizam os parâmetros extrínsecos do modelo de câmera, e relaciona-os com um sistema de referência inercial fixo (FIGURA 2.3). Considerando-se estes efeitos sobre os eixos coordenados deve-se então generalizar a equação (2.5) para:

$$x = K [R | t] X \quad [2.7]$$

onde $[R | t]$ é a *matriz de parâmetros extrínsecos*.

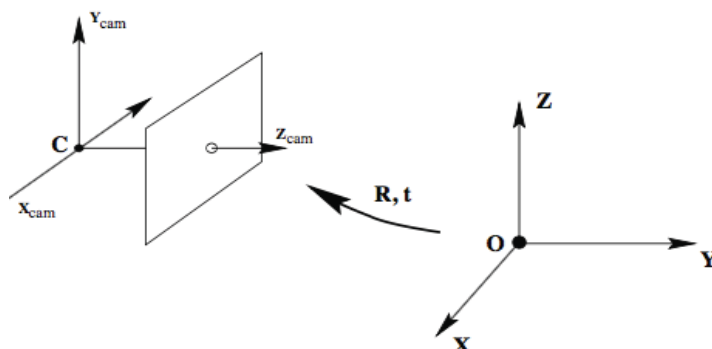


FIGURA 2.3: TRANSFORMAÇÃO EUCLIDIANA ENTRE UM SISTEMA DE COORDENADAS OBJETO (TERRENO) FIXO COM ORIGEM EM O E EIXOS (X, Y, Z) E UM SISTEMA DE COORDENADAS CENTRADO NA CÂMERA DADO PELOS EIXOS $(X_{cam}, Y_{cam}, Z_{cam})$ ATRAVÉS DE UMA ROTAÇÃO R E TRANSLAÇÃO t .
ADAPTADO DE HARTLEY; ZISSERMAN, (2004).

O *modelo pinhole* assume que as coordenadas da imagem são euclidianas e que as escalas em ambos os eixos são iguais. No caso dos sensores *CCD* ou *CMOS*, existe a possibilidade de os pixels não serem quadrados (HARTLEY, 2004; SZELISKI, 2010) e com isso as distâncias focais nos eixos x e y não serem iguais. Com isso, pode-se reescrever [2.6], como:

$$K = \begin{bmatrix} \alpha_x & s & p_x \\ 0 & \alpha_y & p_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad [2.8]$$

onde α_x e α_y se referem ao formato do pixel e s à *skew*. Se s for diferente de zero, os eixos x e y não são ortogonais, e nesses casos, o modelo da câmara *CCD* ou *CMOS* tem 11 graus de liberdade, sendo 5 da matriz K , 3 da matriz R e 3 do vetor t (HARTLEY, 2004; SZELISKI, 2010). Substituindo a equação (2.7) na (2.7) resulta:

$$x = \begin{bmatrix} \alpha_x & s & p_x \\ 0 & \alpha_y & p_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} [R|t]X \quad [2.9]$$

2.4 GEOMETRIA EPIPOLAR

A Geometria Epipolar é um conceito que permite reduzir uma busca essencialmente em duas dimensões (2D), onde seria necessário procurar por um ponto correspondente em toda a imagem, a uma busca em uma dimensão (1D), onde a busca é limitada a uma linha específica (MENDES, 2012). A geometria epipolar tem por objetivo estabelecer as relações entre as imagens capturadas de dois ou mais pontos de vistas distintos. Em outras palavras, dadas duas câmeras dispostas a capturar a mesma cena, onde o par de imagens representa duas perspectivas diferentes, a geometria epipolar tenta estabelecer as relações entre as imagens.

As coordenadas 3D de pontos característicos podem ser recuperadas com informações presentes em mais de uma imagem, assim como o movimento relativo entre as posições de câmera correspondentes a cada uma delas. A recuperação de *movimento e estrutura* pode ser realizada por meio de duas câmeras que visualizam uma mesma cena simultaneamente, processo apelidado de *visão estéreo*, ou

através de duas imagens de uma mesma cena capturada pelo mesmo sensor em diferentes posições e orientações, designado de *estrutura e movimento*. Os dois processos descritos somente são possíveis devido à existência de restrições geométricas entre diferentes projeções em imagens de um mesmo ponto 3D presente na cena. As diferentes projeções são alcançadas visualizando a mesma cena sob diferentes pontos de vista. A geometria que restringe pontos em duas imagens (*geometria epipolar*) pode ser computada para recuperar tanto o movimento relativo entre duas poses de câmera relacionadas com as imagens quanto a estrutura 3D da cena visualizada. O *movimento e estrutura* recuperados são determinados completamente pelos parâmetros internos da câmera e por *correspondências* obtidas entre as imagens, independentemente da cena visualizada.

Dado um par de imagens, qualquer ponto M do espaço 3D define um plano π que contém o ponto M e os centros ópticos C_i e C_j das duas câmeras (FIGURA 2.4). O plano π designa-se por *plano epipolar* e as linhas de intersecção deste plano com os planos das imagens de cada câmera l_i e l_j são definidas por *linhas epipolares conjugadas* (HARTLEY, 2004). Os *epipolos* e_i e e_j correspondem, respectivamente, à intersecção das linhas epipolares l_i e l_j com a linha de base.

A geometria epipolar corresponde à estrutura geométrica entre duas vistas e se expressa matematicamente pela matriz fundamental $F_{i,j}$ de dimensão 3×3 . Denotemos por $F_{i,j}$ a matriz fundamental entre as imagens m_i e m_j . Para cada x_i pixel na imagem m_i , $F_{i,j}$ define uma linha $l_{i,j}^x$ na imagem m_j de tal modo que $l_{i,j}^x = F_{i,j} \times x_i$. A linha epipolar $l_{i,j}^x$ é onde os pontos 3D no raio projetivo através x_i são visíveis na imagem m_j . Isto introduz uma restrição na busca de outros pares correspondentes, de modo que o par de um ponto só pode estar na linha epipolar correspondente. Isso efetivamente reduz o espaço de busca de 2D para 1D.

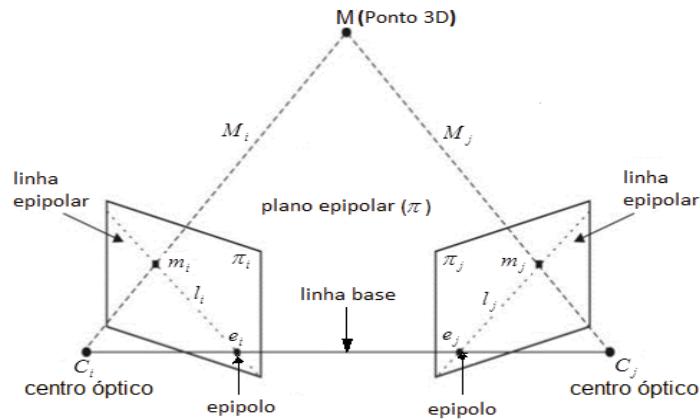


FIGURA 2.4: PRINCIPAIS ELEMENTOS DA GEOMETRIA EPIPOLAR.
ADAPTADO DE STIVANELLO, (2008).

Assumindo que o sistema de coordenadas da câmara, com origem no centro óptico C_i é coincidente com o sistema de coordenadas objeto (terreno), então qualquer ponto no sistema de coordenadas da câmara de centro óptico C_j pode ser obtido através de uma rotação R e uma translação t . Assim, a expressão de um ponto genérico M do espaço 3D, nos sistemas de coordenadas das duas câmaras, é dada por:

$$M_i = [I \ 0]P \quad [2.10]$$

$$M_j = [R \ t]P \quad [2.11]$$

onde I é a matriz identidade, 0 é um vetor nulo e os vetores M_i e M_j contêm as coordenadas dos pontos de emparelhamento entre as duas imagens, m_i e m_j , nos sistemas de coordenadas das respectivas câmaras. O produto:

$$\overline{C_i M_i} (\overline{C_i C_j} \times \overline{C_j M_j}) = 0 \quad [2.12]$$

já que os três vetores $\overline{C_i M_i}$, $\overline{C_i C_j}$ e $\overline{C_j M_j}$ são coplanares; "x" representa o produto vetorial.

No sistema de coordenadas da câmara de centro óptico C_i , a equação (2.12) pode ser reescrita nos seguintes termos:

$$M_i (t \times (R M_j)) = 0 \quad [2.13]$$

onde t é o vetor de translação entre as duas imagens dada por: $t = (t_x, t_y, t_z)$, a partir da qual se define a matriz antissimétrica $[t_X]$, aplicada para evitar o *gimbal*:

$$[t_X] = \begin{bmatrix} 0 & -t_z & t_y \\ t_z & 0 & -t_x \\ -t_y & t_x & 0 \end{bmatrix} \quad [2.14]$$

Então reescrevendo a equação (2.11), deriva-se a matriz essencial E :

$$E = [t_X]R \quad [2.15]$$

A matriz essencial (de tamanho 3x3) é uma simplificação da matriz fundamental através das normalizações das coordenadas. Seus nove coeficientes são apenas definidos por uma escala, e podem ser parametrizados pelos três graus de liberdade da matriz de rotação R e os dois graus de liberdade definindo a direção do vetor de translação t .

Conjugando as equações (2.13) e (2.15) chega-se a relação que incorpora a *matriz essencial* E (LONGUET-HIGGINS, 1981; HUANG, 1989).

$$M_i^T E M_j = 0 \quad [2.16]$$

Modificações são impostas sobre os vetores M_i e M_j quando se trabalha com câmeras não calibradas. No caso em apreço, $m_i = W_i M_i$ e $m_j = W_j M_j$, sendo W_i e W_j as matrizes de calibração intrínsecas para ambas as câmeras e m_i, m_j as coordenadas dos pontos emparelhados entre as duas imagens estéreo. De [2.16] chega-se a *matriz fundamental* $F_{i,j}$, de dimensões 3x3:

$$m_i^T F_{i,j} m_j = 0 \quad [2.17]$$

m_i e m_j jazem sobre as linhas epipolares l_i e l_j , definidas por:

$$l_i = F_{i,j} m_j \quad [2.18]$$

$$l_j = F_{i,j} m_i \quad [2.19]$$

Em Luong, 1996, é mostrado que de [2.17] pode-se computar a matriz

fundamental através da matriz essencial:

$$F_{i,j} = W_i^{-T} E W_j^{-1} \quad [2.20]$$

2.5 ESTIMATIVA DA MATRIZ FUNDAMENTAL

Para calcular a matriz $F_{i,j}$, é necessário certo número de correspondências iniciais entre os pontos de vista i e j . Nas configurações mais gerais da câmera, $F_{i,j}$ tem 8 parâmetros desconhecidos. Cada correspondência constitui uma restrição sobre os parâmetros. Com mais de 8 pares gera-se um sistema sobredeterminado de equações, a ser resolvido usando métodos robustos como o algoritmo de 8 pontos, o RANSAC (HARTLEY, 1997; HARTLEY; ZISSERMAN, 2000), entre outros métodos ver (ZHANG; LOOP, 2001).

2.6 POSE RELATIVA DAS CÂMERAS

A fim de resolver o problema de localização baseado em imagem, precisa-se estimar a pose da câmera de uma determinada imagem. Usando o modelo da câmera pinhole, tanto a calibração externa quanto a matriz de projeção podem ser estimadas a partir de correspondências 2D-3D entre os pontos do espaço objeto (da cena 3D) e as correspondentes projeções 2D conhecidas na imagem.

A posição das câmeras envolvidas no processo pode ser indicada a partir da matriz fundamental. Por conseguinte, os pontos 3D são encontrados de acordo com a resolução da fórmula (2.21).

$$x = K \cdot P \cdot X \quad [2.21]$$

Na fórmula, K representa uma matriz com os parâmetros intrínsecos da câmera, P é a pose da câmera, X retrata o ponto 3D em questão e x o ponto em coordenadas na imagem 2D. Desta forma pode-se calcular a projeção do ponto x (2D) que foi capturado do espaço 3D pela câmera e representá-lo em uma imagem.

2.7 ALGORITMOS SfM (*Structure from Motion*)

2.7.1 VisualSfM

O VisualSfM é uma aplicação gráfica para a reconstrução 3D de objetos a

partir de imagens que utiliza o sistema SfM. O software é uma reimplementação do sistema SfM do Projeto *Photo Tourism* e inclui melhorias, integrando tanto SIFT na unidade de processamento gráfica (SiftGPU) e MBA (*Multicore Bundle Adjustment*) (WU, 2011). É apresentado em forma de um serviço *web* que pode processar automaticamente até 1000 imagens. Para mais precisão, pontos de controle podem ser adicionados para georreferenciamento (KUNG, 2001). Além disso, ele fornece uma interface para executar ferramentas como PMVS/CMVS, que prepara os dados para o software CPMVS (FURUKAWA; PONCE, 2010).

O algoritmo SfM (integrado no VisualSFM) faz uso de características pré-detectadas para criar os modelos 3D, que contêm nuvem de pontos esparsos cobrindo a geometria da cena, bem como os parâmetros da câmara (HARTLEY; ZISSERMAN, 2000; NIETHAMMER *et al.*, 2012). Para aumentar ainda mais o nível de detalhe na nuvem de pontos, o algoritmo PMVS2 (FURUKAWA; PONCE, 2007) é aplicado à saída do algoritmo SfM, que resulta em uma nuvem de pontos com alta densidade.

2.7.2 Structure From Motion

O *Structure from Motion* (SfM) é um processo de estimação simultânea da geometria 3D do espaço e do movimento (posição das câmeras) através de uma sequência de imagens. Considerando a existência de diversas abordagens para algoritmos SfM, a seguir, é descrita a abordagem do algoritmo implementado no projeto Bundler da *Photo Tourism*.

Dada uma reconstrução inicial a partir de duas câmeras I_1 e I_2 , pode-se ampliar o modelo 3D, adicionando uma terceira câmara I_3 observando alguns pontos 3D já contidos no modelo inicial (SNAVELY; SEITZ; SZELISKI, 2008a). As correspondências 2D-3D resultantes podem ser usadas para estimar a pose da câmara de I_3 em relação à reconstrução. A câmara, neste caso, é uma imagem 2D e uma posição relativa mostrando a localização do dispositivo a quando da tomada da foto.

Novos pontos de cena podem então serem trianguladas a partir de correspondências 2D-2D entre I_3 e uma das duas câmeras iniciais. Da mesma forma, outras câmeras podem ser incorporadas na reconstrução. Sendo que várias

imagens podem ser adicionadas, então pode ser escolhida uma câmera observando o maior número possível de pontos 3D (SNAVELY; SEITZ; SZELISKI, 2008a).

2.7.2.1 Intersecção fotogramétrica

Dado um par de câmeras P , P' e um par de pontos correspondentes $m_i \leftrightarrow m_j$, a intersecção consiste na computação de um ponto M do espaço 3D, em que M projeta o par de pontos correspondente nas imagens, respeitando a restrição epipolar $m_j^T F_{i,j} m_i = 0$. O processo de intersecção é ilustrado na Figura 2.4. A restrição epipolar denota que existem dois raios sobre o plano epipolar que passam pelos pontos correspondentes e pelos centros de projeção de cada câmera, intersectando no ponto M no espaço 3D. Outrossim, o ponto m_i está sobre a linha epipolar $F_{i,j}^T m_j$ e m_j sobre $F m_i$.

Entretanto, as coordenadas dos pontos correspondentes m_i e m_j podem conter algum tipo de ruído, gerado por erros de estimação, por exemplo, fazendo com que o ponto de intersecção M , relativo aos raios que projetam m_i e m_j , não possa ser estabelecido, ou seja, M pode não satisfazer ambas as equações $m_i = PM$ e $m_j = P'M$. Ademais, se o ponto de intersecção M não é determinado, os pontos m_i e m_j não satisfazem a restrição epipolar $m_j^T F_{i,j} m_i = 0$.

Com base nessas premissas, uma solução aproximada para M deve ser estimada. Um método linear de intersecção que estima M é apresentado em (HARTLEY & ZISSERMAN, 2004).

2.7.2.2 Bundle Adjustment

A fim de evitar a acumulação de erros durante o processo de reconstrução incremental no SfM, é usado o BA (*Bundle Adjustment* - ajustamento por feixes) (TRIGGS *et al.*, 2000) para refinar simultaneamente tanto os parâmetros da câmera como as posições do ponto 3D cada vez que uma nova imagem é adicionada (SNAVELY; SEITZ; SZELISKI, 2008a). O BA otimiza estas quantidades, minimizando o quadrado da soma da reprojeção dos erros (TORSTEN, 2013), equação (2.22).

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M v_{ij} \|x_{ij} - P_i X_j\|_2^2 \quad [2.22]$$

Sendo $P=K[R|\bar{T}]$ a matriz de projeção da câmera; K a matriz intrínseca; R a matriz rotação, e \bar{T} o vetor de translação (HARTLEY & ZISSERMAN, 2004). N e M os números de câmeras e de pontos 3D no problema SfM. v_{ij} é uma variável binária indicando a visibilidade do $j^{\text{ésimo}}$ ponto X_j na $i^{\text{ésima}}$ imagem; e x_j^i a projeção do ponto 3D de X_j na imagem observada no momento.

De ponto de vista geométrico, (2.22) mede o quadrado da soma das distâncias entre as localizações previstas e mensuráveis da imagem, da configuração de uma reconstrução. Assim, o erro (2.22) representa o quão corretamente às poses e estrutura da câmara se relacionam com as informações das feições contidas nas imagens de entrada.

Do ponto de vista estatístico, o BA é um procedimento de regressão que encaixa os parâmetros do modelo (poses da câmera e configuração 3D da estrutura) em dados ruidosos de entrada (as medidas de imagens). Os parâmetros em (2.22) têm um significado preciso quando o ruído mensurado para as características da imagem for normalmente distribuído e isotrópico. Neste caso, o BA dá a solução de máxima verossimilhança para equação (2.22).

2.7.2.3 Feições Locais

Para cada foto a ser incluída na reconstrução SfM, detectam-se feições locais da imagem. Cada feição é associada a um descritor que oferece uma representação matemática da região (*image patch*) em torno da posição 2D da imagem.

Pode-se, então, obter as correspondências 2D-2D entre feições encontradas em duas imagens, que são necessários para reconstruir a cena, combinando os descritores na primeira imagem contra os descritores na segunda imagem. Muitos processamentos na visão computacional usam feições e descritores obtidos com o SIFT (LOWE, 2004), que se tornou padrão para o SfM (CRANDALL *et al.*, 2011; FRAHM *et al.*, 2010; SNAVELY; SEITZ; SZELISKI, 2006; SNAVELY; SEITZ; SZELISKI, 2008a).

2.7.2.3.1 Detecção de Feições

O SIFT (*Scale Invariant Feature Transform*) é um algoritmo de visão computacional publicado por David Lowe, em 1999 (LOWE, 1999). O SIFT transforma uma imagem num enorme grupo de vetores locais de feições (*features*), em que cada um é invariante à translação, escala, rotação da imagem e parcialmente invariante às alterações na luminosidade e a projeções tridimensionais. Os vetores resultantes são designados de pontos SIFT.

2.7.2.4 Etapas do Algoritmo SIFT

O algoritmo SIFT é executado através de quatro etapas principais: detecção de extremos, localização de pontos-chave, definição da orientação e descrição dos pontos-chave. As duas primeiras descrevem a parte do detector e as duas seguintes descrevem a formação do descritor. A descrição das partes a seguir baseia-se em (LOWE, 2004).

2.7.2.4.1 Detecção de extremos

A primeira etapa da técnica SIFT consiste em buscar pontos que sejam invariantes a mudanças de escala da imagem, possibilitando a detecção de pontos com a câmara próxima ou distante do objeto de interesse. Tal objetivo é alcançado procurando características estáveis em diferentes escalas, utilizando uma função chamada de espaço - escala (*scale space pyramid*), que neste caso é a função Gaussiana.

Uma imagem $I(x, y)$ passa a ser definida por uma função $L(x, y, \sigma)$, no espaço-escala. Esta função é produzida pela convolução de uma função gaussiana, $G(x, y, \sigma)$, com a imagem, $I(x, y)$:

$$L(x, y, \sigma) = G(x, y, \sigma) * I(x, y) \quad [2.23]$$

onde:

$$G(x, y, \sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2\sigma^2}} \quad [2.24]$$

O filtro (2.24) é variável à escala através do parâmetro σ . A eficiência da

busca por pontos-chaves é aumentada com a utilização de uma função *DoG* (*Difference of Gaussian*) formada pela diferença de imagens filtradas em escalas próximas, separadas por uma constante de escala k . Na implementação de SIFT, σ é aumentada por um fator constante k , isto é:

$$\sigma_{i+1} = k \cdot \sigma_i \quad [2.25]$$

A função *DoG* é definida por:

$$DoG = G(x, y, k\sigma) - G(x, y, \sigma) \quad [2.26]$$

O resultado de efetuar a convolução de uma imagem com o filtro *DoG* é dado por:

$$D(x, y, \sigma) = (G(x, y, k\sigma) - G(x, y, \sigma)) \times I(x, y) \quad [2.27]$$

$$= L(x, y, k\sigma) - L(x, y, \sigma) \quad [2.28]$$

Na essência, o *DoG* é uma adaptação do Laplaciano de Gaussiano, e resume-se na diferenciação entre imagens consecutivas (FIGURA 2.5a). As imagens obtidas através da *DoG* são aproximadamente equivalentes às que seriam obtidas usando o Laplaciano de Gaussiano, exigindo menos tempo computacional e tornando o processo que seria intensivo num processo mais leve, rápido e eficiente. Aliás, a principal ideia deste algoritmo é reduzir o custo computacional com tempo de processamento através de operações executadas apenas em pontos potenciais (regiões com forte variação de níveis de cinza, tais como bordas ou cantos).

O raciocínio para detectar os pontos SIFT reduz-se em dois passos: (i) encontrar os pontos mínimos e máximos nas imagens obtidas pela *DoG* e (ii) encontrar o subpixel mínimo e máximo.

O primeiro passo busca percorrer todos os pixels e verificar a sua vizinhança. A vizinhança engloba os pixels circundantes das imagens anterior e seguinte, ver Figura. 2.5b. O mínimo e máximo da *DoG* é obtido pela comparação de um pixel (assinalada com X) com os 26 vizinhos nas regiões 3x3 das escalas corrente e adjacentes (assinaladas com círculos verdes). Os pontos selecionados são considerados apenas uma aproximação dos máximos e mínimos, isto porque estes não se encontram exatamente num pixel, situam-se algures entre cada pixel. Neste

caso, é necessário encontrar matematicamente o subpixel. O subpixel é determinado pela expansão de Taylor da imagem, em torno do ponto SIFT aproximado.

Conhecendo os pontos SIFT, eliminam-se os pontos que se localizam ao longo de uma extremidade ou que não possuam contraste suficiente. Não sendo, estes pontos úteis para serem utilizados como *features*, são eliminados. O método de remoção de *features* que estão nas extremidades, é equivalente ao *Harris Corner Detector* (HARRIS; STEPHENS, 1988).

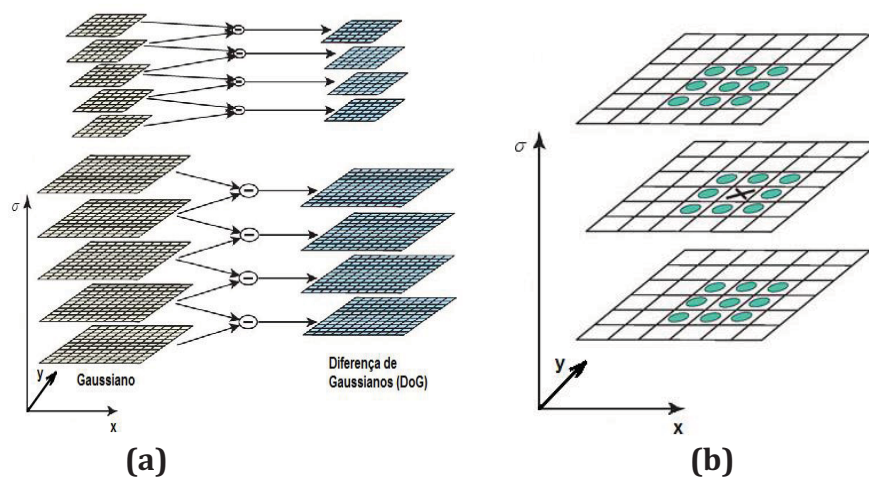


FIGURA 2. 5: (a) PARTE DO ESPAÇO-ESCALA CONSTRUÍDA PELO DETECTOR SIFT. (b) DETECÇÃO DE EXTREMOS NO ESPAÇO-ESCALA.

ADAPTADO DE LOWE, (2004).

2.7.2.4.2. Localização Exata dos Pontos Chaves

Na sequência, os pontos detectados devem ser localizados e se não forem estáveis, devem ser descartados. A localização exata de um ponto chave $X_o = (x, y, \sigma)$ é obtida por ajuste de uma função quadrática 3D em torno de X_o , tomando a posição interpolada do seu extremo. Para cada ponto analisado é utilizada uma expansão de Taylor da função no espaço escala $D(x, y, \sigma)$, deslocada de modo que a origem desta expansão esteja localizada no ponto de amostragem (LOWE, 2002):

$$D(X) = D(X_o) + X^T \frac{fD}{fX}(X_o) + \frac{1}{2} X^T \frac{f^2 D}{fX^2}(X_o) X \quad [2.29]$$

Para obter o extremo de $D(X)$, calcula-se a derivada de $D(X)$ e iguala-se o resultado a zero. Desta forma, obtém-se:

$$\frac{\partial^2 D}{\partial X^2}(X_o)\Delta X = -\frac{\partial D}{\partial X}(X_o) \quad [2.30]$$

ΔX é o deslocamento (*offset*) do ponto extremo em relação ao ponto original X_o , de modo que o ponto-chave refinado é localizado em:

$$X = X_o + \Delta X \quad [2.31]$$

Se o *offset* ΔX for maior que 0.5 em alguma dimensão, significa que o extremo está mais próximo de outro ponto amostral. Nesse caso, o ponto amostrado é mudado e a interpolação é realizada para esse novo ponto. O *offset* ΔX final é adicionado à localização do ponto analisado para se estimar a interpolação para a localização do extremo.

O valor da função no extremo, $D(X)$, é útil para a rejeição de extremos instáveis com baixo contraste, que seriam sensíveis a ruído. Substituindo $X = X_o + \Delta X$ na equação (2.28) obtém-se o valor *DoG*:

$$D(X) = D(X_o) + \frac{1}{2} \Delta X^T \frac{\partial D}{\partial X}(X_o) \quad [2.32]$$

É aconselhado por Lowe (2004) que se rejeitem valores de $|D(X_o)|$ inferiores a um determinado limiar (0,03), assumindo-se que os valores dos *pixels* em tons de cinza da imagem estejam entre [0, 1].

Adicionalmente ao procedimento apresentado para se descartar pontos, Lowe ainda aponta que a função *DoG* possui resposta “forte” ao longo de arestas, mesmo que a localização ao longo da borda seja mal determinada, *i.é.*, pontos em arestas poderiam ser escolhidos como pontos de interesse, o que não é desejável. Por estas razões, eles têm de ser descartados.

Além do procedimento apresentado para se descartar pontos, Lowe (2004) ainda aponta que a função *DoG* possui resposta “forte” ao longo de arestas, mesmo que a localização ao longo da borda seja mal determinada, *i.é.*, pontos em arestas poderiam ser escolhidos como pontos de interesse, o que não é desejável. Não

sendo, estes pontos úteis para serem utilizados como *features*, são detectados e eliminados. O método de remoção de *features* próximos de arestas é feito usando-se uma matriz Hessiana 2×2 (H), computada na localização e escala dos pontos-chave na função D .

$$H(x,y) = \begin{bmatrix} D_{xx} & D_{xy} \\ D_{xy} & D_{yy} \end{bmatrix} \quad [2.33]$$

Onde as derivadas D_{xx}, D_{xy}, D_{yy} são calculadas tomando as diferenças de pontos de amostra vizinhos no espaço de escala.

A Hessiana representa assim uma segunda derivada, permitindo mensurar as magnitudes das curvaturas de D a partir de seus autovalores.

2.7.2.4.3. Atribuição da Orientação dos Descritores

Ao se atribuir uma orientação consistente para cada ponto chave baseada nas propriedades da imagem, pode-se representar os descritores em relação a esta orientação, conseguindo-se assim invariância quanto à rotação (LOWE, 2004). O descritor é então calculado em relação a esta orientação. A escala σ do ponto chave é utilizada para selecionar a imagem suavizada L com o filtro Gaussiano, com escala mais próxima ao ponto chave e oitava referente ao ponto avaliado. Portanto, todos os cálculos passam a ser executados com invariância à escala.

Assim, cada *feature* é uma sequência $f = (x, y, \sigma, \theta)$ definida para cada amostragem da imagem na escala, $L(x, y, \sigma)$, a magnitude $m(x, y)$ (equação 2.34) e orientação $\theta(x, y)$ (equação 2.35) do gradiente usando as diferenças de *pixels* (ver FIGURA 2.6b):

$$m(x,y) = \sqrt{\left(L(x+1,y) - L(x-1,y)\right)^2 + \left(L(x,y+1) - L(x,y-1)\right)^2} \quad [2.34]$$

$$\theta(x,y) = \tan^{-1} \left(\frac{\left(L(x,y+1) - L(x,y-1)\right)}{\left(L(x+1,y) - L(x-1,y)\right)} \right) \quad [2.35]$$

Posteriormente é criado um histograma, onde os 360 graus de orientação são divididos em 36 intervalos de 10 graus cada. Este procedimento é aplicado para

todos os pixels em torno do ponto SIFT, e a orientação é determinada pelo ponto mais alto do histograma, mostrado na Figura 2.6a. O eixo dos X representa graus e o eixo Y representa os valores de soma dos números dos gradientes. A direção com o maior valor irá ser considerado como o sentido dos pontos chave (LOWE, 2004).

Cada ponto na vizinhança do ponto-chave é adicionado ao histograma com um valor de peso determinado. O primeiro peso é o valor da magnitude $m(x, y)$ de cada ponto adicionado. O segundo peso é dado por uma janela Gaussiana circular com σ' igual a 1,5 vezes maior que a escala do ponto-chave. Esta janela é definida pela equação Gaussiana:

$$g(\Delta x, \Delta y, \sigma') = \frac{1}{2\pi\sigma'^2} e^{-\frac{1}{2\sigma'^2}(\Delta x^2 + \Delta y^2)} \quad [2.36]$$

onde Δx e Δy são as distâncias entre cada ponto verificado e o ponto-chave.

Finalmente, é preciso criar uma identificação única para cada ponto SIFT, em torno do qual se gera uma janela 16x16. Cada janela é subdividida em janelas de 4x4. O gradiente de magnitudes e orientações é determinada dentro de cada janela 4x4. Tais orientações são colocadas num histograma de 8 intervalos. Os resultados das orientações são normalizados, e colocam-se em forma de vetores. Este conjunto de vetores identifica o ponto SIFT. Para tornar a identificação independente da rotação, a rotação dos pontos é subtraída a todas as orientações, e assim os gradientes de orientação ficam relativos à orientação do ponto SIFT.

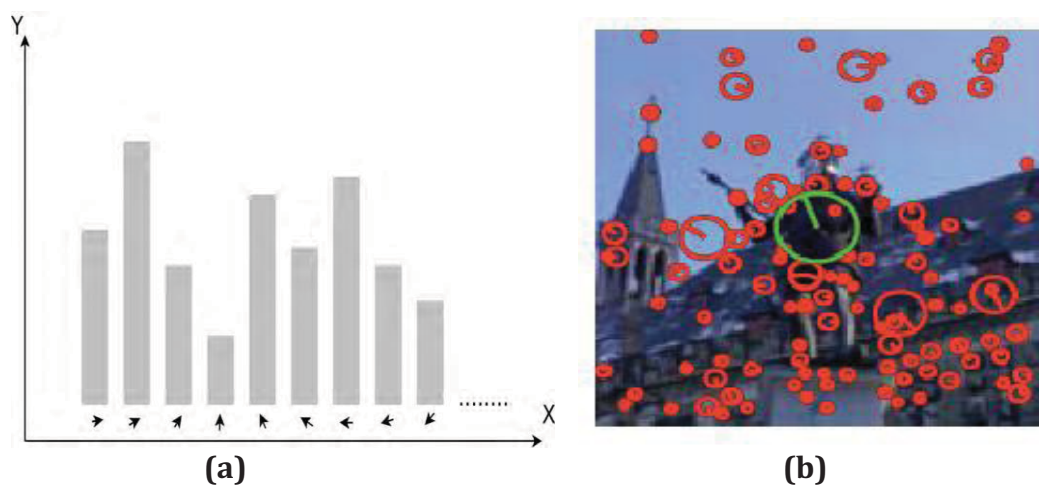


FIGURA 2.6: (a) HISTOGRAMA DE ORIENTAÇÕES DE UM PONTO-CHAVE. (b) ILUSTRAÇÃO DE FEATURES SIFT COM ESCALAS E ORIENTAÇÕES, DETECTADAS EM UMA IMAGEM. ADAPTADO DE LOWE, (2004).

2.7.2.4.4. Construção do Descritor Local

Nesta fase, os valores obtidos são normalizados e para cada ponto-chave é atribuído um descritor invariante à iluminação, ao ponto de vista e à rotação. O descritor de pontos chave é mostrado no lado direito da Figura 2.7, onde os gradientes são representados pelas pequenas setas em cada amostra da localização. São definidas $n \times n$ regiões de amostragem com $k \times k$ pixels cada ao redor da localização do ponto-chave. Para cada região é construído um histograma de orientação de oito direções, com comprimento de cada seta correspondendo à magnitude de cada entrada do histograma. Na figura em alusão é mostrada uma matriz 2x2 com 8 orientações em cada posição, ou seja, um vetor característico com 32 elementos para cada ponto chave (LOWE, 2004). Lowe, 2004 afirma que os melhores resultados foram obtidos quando se usou uma matriz de 4x4 histogramas, com 8 direções em cada. O vetor característico resultante tem 128 elementos com uma janela de apoio total de 16×16 pixels.

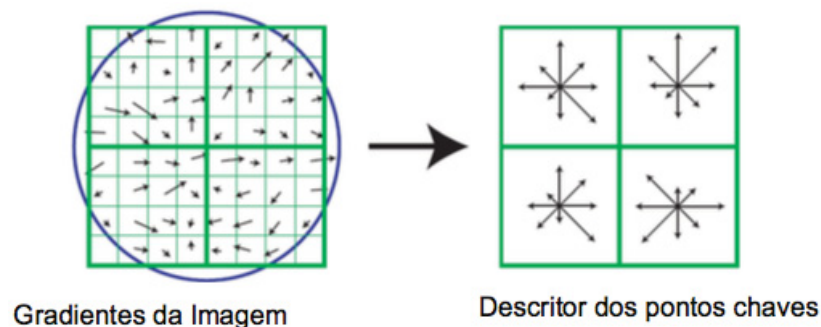


FIGURA 2.7: CONSTRUÇÃO DO DESCRITOR PARA UM PONTO-CHAVE DE 2X2 COM 48 ELEMENTOS.

FONTE: LOWE, (2004).

O vetor de elementos descritores é modificado para reduzir os efeitos na mudança de iluminação. O primeiro passo é normalizar o vetor, e em seguida fazer uma mudança no contraste da imagem, no qual cada valor de pixel é multiplicado por uma constante. Uma mudança no brilho na qual uma constante é adicionada para cada pixel da imagem não irá afetar os valores dos gradientes, pois eles são computados de diferentes pixels. Dessa forma, o descritor é invariante a pequenas mudanças de iluminação. Mudanças não lineares de iluminação podem ocorrer devido à saturação das câmeras ou devido a mudanças de iluminação que afetem superfícies 3D com diferentes orientações. Esses efeitos podem causar uma grande mudança nas magnitudes relativas para alguns gradientes, mas afetam menos as

orientações dos gradientes. Com isso consegue-se reduzir a influência das grandes magnitudes do gradiente com um valor de limiar. Após a normalização, todos os valores acima de um determinado limiar são ajustados para este limiar. Isto é feito para que direções com magnitude muito grande não dominem a representação do descritor. É sugerido usar um valor de limiar 0,2, e então o vetor é normalizado novamente para a unidade de tamanho. De acordo com Lowe (2004) o valor 0,2 foi obtido por meio de testes usando imagens com diferentes iluminações para um mesmo objeto 3D.

São dois os parâmetros que podem ser usados para variar a complexidade do descritor: o número de orientações, q , nos histogramas e o tamanho, n , na matriz $n \times n$ do histograma de orientações. O tamanho do vetor do descritor resultante é qn^2 . Com isto será possível discriminar melhor as características em uma base de dados muito grande, mas os descritores serão mais sensíveis à distorção de forma e oclusão (LOWE, 2004).

Para cada imagem, são construídos diversos descritores, cada um referente a um ponto chave. Quando se aplica o algoritmo SIFT em uma imagem, tem-se como resultado um conjunto de descritores, que são usados para se fazer a correspondência entre duas imagens.

Aplicado ao programa VisualSfM, o algoritmo SIFT tem por finalidade identificar pontos comuns entre fotografias (pontos-chave), permitindo assim que seja criado um modelo.

2.7.3 CMVS (*Clustering for Multi-View Stereo*)

O CMVS é um programa de código aberto que permite a entrada de um conjunto de imagens em perspectiva e marcadores, com posições e calibrações de câmara, e emite uma malha de textura da cena rígida. O CMVS funciona como SfM para imagens arbitrariamente organizadas e foi desenvolvido para *Photo Tourism*, projeto da *Microsoft* (SNAVELY *et al.*, 2006). A extração de características nas imagens é realizada pelo SIFT, algoritmo de Lowe, 2004. O software suporta dados de calibração da câmara (distância focal f a partir de dados EXIF, dois parâmetros de distorção radial k_1 e k_2), orientações de imagem e um ponto da nuvem fina 3D

(geometria da cena) como resultados para quaisquer blocos de imagem usando o *bundle block adjustment* modificado de Lourakis & Argyros (2004). Os resultados de CMVS geram pontos de turvação mais densos de objetos, bem como coordenadas 3D, adicionalmente, cada ponto recebe o valor da cor do objeto tomada a partir das imagens.

2.7.4 PBA (*Parallel Bundle Adjustment*)

O PBA ou *Multicore Bundle Adjustment* (ajustamento por feixes perspectivos com vários núcleos) é um acelerador que integra núcleos de CPU e GPU (WU, *et al.*, s/a). Reestruturando o problema de otimização não linear, o cálculo geral torna-se dominado por uma série de operações matriz-vetor simples. As operações matriz-vetor são realizadas em paralelo com uma combinação de *multi-threading* (processos em paralelo) e SIMD (*Single Instruction Multiple Data*).

Este algoritmo aplicado no programa VisualSFM, tem a importante função de criar o modelo 3D provisório, isto é, definido por uma baixa densidade de pontos (AGARWAL; SNAVELY; SEITZ, s/a). O modelo referido é criado a partir dos pontos chave (SIFT) permitindo estes pontos identificar objetos iguais em fotografias diferentes. Para a criação de um modelo correto, os pontos referidos devem abranger toda a zona de estudo. Desta forma o modelo criado também irá abranger essa zona.

2.7.5 PMVS2 (*Patch Multi-View Stereo*)

O algoritmo PMVS2 é usado para fins de produção reais pela *Industrial Light & Magic*, *Weta Digital*, e *Google Inc*. Aplicado ao VisualSFM, este algoritmo utiliza a nuvem de pontos 3D esparsa criada pelo algoritmo PBA, e associa-lhe uma maior densidade de pontos. O resultado é uma nuvem densa de pontos, surgindo assim a reconstrução final do objeto de estudo. O resultado pode então ser transportado a outros softwares para refinamento como Matlab, Meshlab, etc.

2.8 USO DA TRIANGULAÇÃO DE DELAUNAY NO TRATAMENTO DE NUVENS DE PONTOS

Uma "Nuvem de Pontos" é um conjunto de pontos em um sistema de coordenadas tridimensional, sem nenhuma topologia que os relaciona. Estes pontos são normalmente definidos por respectivas coordenadas XYZ, e geralmente representam amostras da superfície exterior de um objeto.

Um método comum de identificação destas amostras de superfície é o tratamento de uma malha de triângulos irregulares, a qual é construída com emprego da triangulação de Delaunay. A triangulação consiste em encontrar segmentos de retas que conectam pontos de maneira que nenhum segmento se cruza e cada ponto seja vértice de pelo menos um triângulo gerado. Tal como acontece com os outros métodos de reconstrução, a ideia por trás da triangulação de Delaunay é reconstruir uma superfície S a partir de um conjunto finito de pontos P .

A triangulação de Delaunay otimiza simultaneamente os comprimentos das arestas e o ângulo em cada par de triângulos, construindo triângulos os mais próximos possíveis da forma equilátera. O critério Delaunay assegura que na construção de triângulos, nenhum vértice encontra-se no interior de qualquer uma das circunferências circunscritas dos triângulos do conjunto de pontos. A Triangulação de Delaunay de um determinado conjunto de pontos é o dual do diagrama de Voronoi, ou seja, tendo uma é possível obter a outra. O diagrama de Voronoi (também chamado de *Thiessen* ou *Dirichlet tessellation* – tesselação) é um conjunto de células (polígonos fechados), onde cada célula contém os pontos mais próximos de seu centro que qualquer outro vértice. Cada linha da célula de Voronoi é equidistante de dois vértices, sendo o ponto onde três linhas se encontram o baricentro da célula. Na Figura 2.8, pode ser observado o diagrama de Voronoi (representado por linhas tracejadas) e a triangulação de Delaunay (representada por linhas sólidas) criada a partir de um conjunto de pontos.

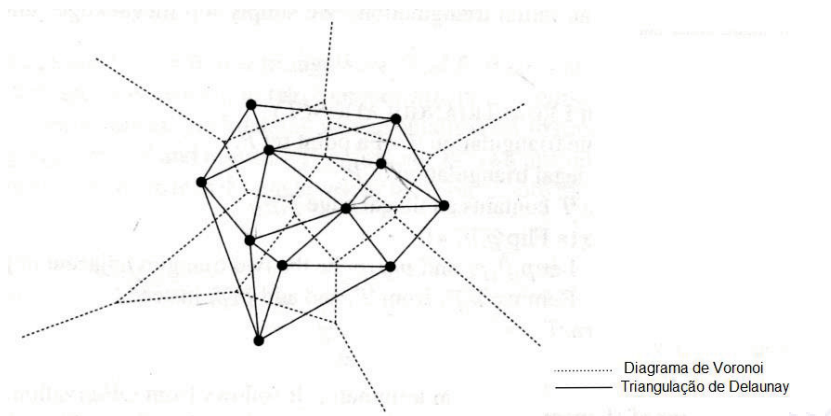


FIGURA 2.8: TRIANGULAÇÃO DE DELAUNAY E DIAGRAMA DE VORONOI. REPRESENTAÇÃO DA DUALIDADE ENTRE AMBOS.

FONTE: ADAPTADO DE SHAMOS; HOEY, (1975).

A triangulação de Delaunay é usada para extração de edifícios ou parte delas. A interseção de planos adjacentes determina a estrutura do telhado da edificação, assim como a interseção de planos com as bordas externas do mesmo determina o contorno da edificação.

2.9 POTENCIAL SOLAR

2.9.1 Movimento solar e direcionamento de painéis fotovoltaicos

A quantidade e intensidade da radiação solar que atinge a superfície da Terra dependem da relação geométrica da Terra com respeito ao Sol. Quando o sistema de coordenadas da Terra é estendido à esfera celeste, como na Figura 2.9, é possível calcular a posição exata do Sol em relação a uma superfície horizontal, em qualquer ponto na terra (FOSTER *et al.*, 2010).

Na Figura 2.9, χ representa o ângulo da ascensão reta. A origem da contagem da ascensão reta ($\chi = 0^\circ$) é necessariamente um ponto sobre o equador celeste. $\chi = 0^\circ$ nos equinócios, altura em que o Sol está posicionado diretamente sobre o equador da Terra.

Além do movimento de rotação em torno do seu eixo, a Terra orbita o Sol durante um ano descrevendo uma trajetória elíptica. Durante esse movimento a direção do seu eixo permanece constante formando um ângulo $\delta_o = 23,45^\circ = 23^\circ 27'$ com a normal ao plano da órbita (inclinação axial). Portanto, o ângulo entre o plano

equatorial da Terra e a linha Terra-Sol varia entre $\pm 23,45^\circ$ ($-23,45^\circ \leq \delta \leq 23,45^\circ$) durante todo o ano. Este ângulo é chamado de ângulo de declinação (δ). Declinações ao norte do equador são positivas (verão no hemisfério norte); a sul são negativas. Ela pode ser aproximada pela seguinte equação:

$$\delta \cong 23,45^\circ \sin \left[360^\circ \left(\frac{284 + n}{365} \right) \right] \quad [2.37]$$

onde n é o dia Juliano do ano, $1 < n < 365$ (contado a partir de 1 de Janeiro até 31 de Dezembro). O valor de δ calculado a partir da equação (2.37) é correto dentro de $+0,37^\circ$ (com desvio positivo máximo em 1 de Maio) e $-1,70^\circ$ (com desvio negativo máxima em 9 de outubro) (ENRICO, 1977).

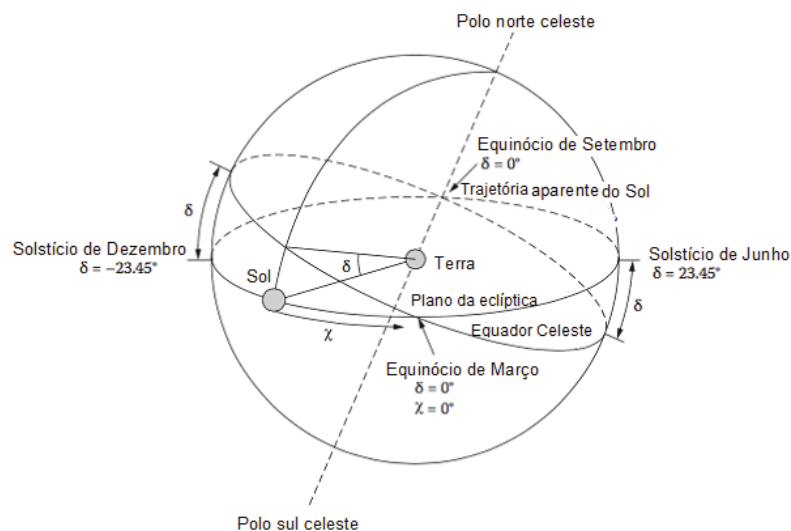


FIGURA 2.9: SISTEMA DE COORDENADAS CELESTES.
ADAPTADO DE: FOSTER *et al.*, (2010)

A mudança da declinação do Sol com o tempo está associada ao movimento de translação da Terra e é causada exclusivamente pela inclinação do eixo da Terra. Como consequência dessa inclinação o Sol não atinge a Terra sempre com a mesma inclinação para a mesma hora do dia.

A Figura 2.10 mostra a direção dos feixes da radiação solar durante três declinações particulares. Quando $\delta = 0^\circ$, durante os equinócios de outono (20/21 de Março) e primavera (22/23 de Setembro), os equadores do Sol e da Terra caem no mesmo plano (isto é, ambos os eixos de rotação são paralelos). Nessas datas, o dia e a noite possuem durações iguais em todas as regiões do globo terrestre. Ainda com $\delta = 0^\circ$, o comportamento da altura solar como função do ângulo horário ou tempo solar, de acordo com a equação (2.40), é simétrica em ambos os hemisférios.

Para $\delta = -23,45^\circ$, no solstício de Dezembro, o Polo Norte da Terra aponta $23,45^\circ$ fora do eixo de rotação do Sol, fazendo com que o Polo Sul fique mais exposto à radiação solar resultando ao dia mais longo do ano. Finalmente, quando $\delta = +23,45^\circ$, no solstício de Junho, o Polo Norte está mais perto $23,45^\circ$ do Sol e o Polo Sul fica mais afastado, a mesma distância angular, correspondendo ao dia mais curto e a noite mais longa do ano. Vale ressaltar que essa análise é válida para o hemisfério sul. Em relação às datas desses fenômenos, no hemisfério norte ocorre exatamente o oposto.

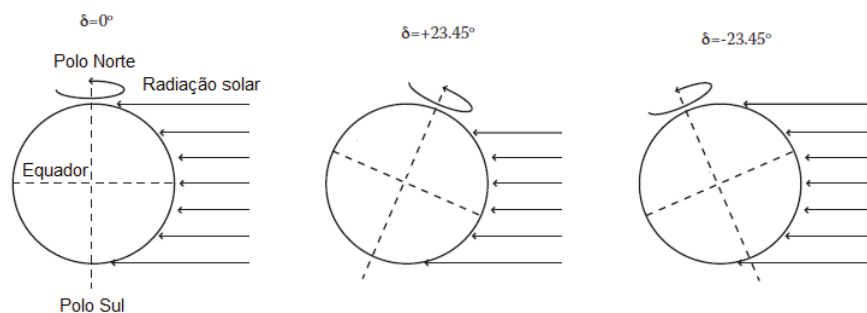


FIGURA 2.10: DIREÇÃO DE INCIDÊNCIA DE FEIXE DE RADIAÇÃO SOLAR PARA A TERRA DURANTE OS EQUINÓCIOS COM $\delta = 0^\circ$, NO SOLSTÍCIO DE JUNHO COM $\delta = +23,45^\circ$ E NO SOLSTÍCIO DE DEZEMBRO COM $\delta = -23,45^\circ$.

ADAPTADO DE: FOSTER *et al.*, (2010)

A posição do Sol relativamente a um ponto da Terra varia ao longo do dia e durante o ano. Para descrever a posição do Sol em relação a uma superfície da Terra, a qualquer momento, faz-se necessário levar em conta relações geométricas entre os raios solares e a superfície terrestre descrito por meio de ângulos com base nas coordenadas da Terra. A Figura 2.11 apresenta as relações geométricas entre estes ângulos para determinar a posição do sol no céu a qualquer momento, note que PNC corresponde ao polo norte celeste.

Altura solar (α_s): ângulo formado entre o raio solar e a sua projeção sobre o plano horizontal. A altura solar é medida em graus, a partir do horizonte da projeção do feixe de radiação para a posição do Sol. $\alpha_s = 0^\circ$ quando o Sol está acima do horizonte, e $\alpha_s = 90^\circ$ quando está no zênite. Na maioria das latitudes, o Sol nunca passa diretamente a cima; isso só acontece dentro dos trópicos.

Ângulo de incidência (ϕ): é o ângulo formado entre os raios de sol e a normal à superfície de captação.

Ângulo zenital (θ_z): é o ângulo formado entre os raios do sol e a vertical local (zênite); equivale à distância angular entre o feixe solar e a vertical do local de incidência. Fica claro, tanto pelas definições quanto pela figura, que a altura e a distância zenital são ângulos complementares, ou seja:

$$\alpha_s + \theta_z = 90^\circ \quad [2.38]$$

Podendo ser calculado pela seguinte relação:

$$\cos \theta_z = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega \quad [2.39]$$

Além disso, existe uma forte relação entre os ângulos azimutal e horário. O ângulo compreendido entre a projeção da normal à superfície no plano horizontal e a direção Norte-Sul é denominado de ângulo azimutal do sol (γ_s). O deslocamento angular é tomado a partir do Norte geográfico (0°) e está compreendido entre -180° e 180° , sendo considerado positivo quando a projeção se encontra à esquerda do Norte e negativo quando se encontra à sua direita. O ângulo horário (ω): é ângulo entre o meridiano do Sol e o meridiano do local. O ângulo horário considera (abarca) todo o intervalo de horas entre o nascer e o pôr-do-sol (se move através de 360° ao longo do dia) considerado negativo pela manhã e positivo à tarde. Dado que a Terra faz aproximadamente uma volta a cada 24 horas, a cada hora angular corresponde a um deslocamento de 15° .

Como mencionado antes, a duração do dia varia para todas as latitudes durante o ano e, com isso, a altura solar α_s também muda a cada horário e diariamente. Este ângulo pode ser calculado em termos da declinação solar δ , latitude ϕ , e ângulo horário ω usando a seguinte equação:

$$\sin \alpha_s = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega \quad [2.40]$$

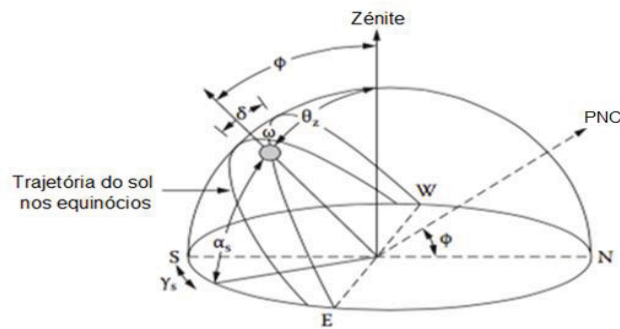


FIGURA 2.11: POSIÇÃO DO SOL NO CÉU EM RELAÇÃO AOS ÂNGULOS SOLARES.

ADAPTADO DE FOSTER *et al.*, (2010)

2.9.2. Ângulo de inclinação e orientação do painel fotovoltaico

Os fatores responsáveis pela otimização da quantidade de radiação recebida por uma superfície de painel solar são a sua orientação e o ângulo de inclinação. O ângulo de inclinação é definido como o ângulo entre a superfície do painel solar e o plano horizontal na direção Norte - Sul. A orientação do painel solar é determinada com respeito à direção este/oeste. O ângulo ideal da inclinação de um painel fotovoltaico depende apenas da latitude e é voltado para o sul no hemisfério norte. No hemisfério sul, o ângulo de inclinação se inverte.

Villalva (2012) observou de que o melhor aproveitamento da energia solar ocorre quando os raios solares incidem perpendicularmente ao módulo solar, com ângulo de inclinação $\beta=0$. Isto significa que idealmente, para maximizar a captação da energia, a inclinação do módulo solar deve ser ajustada diariamente para adequar-se ao valor da altura solar naquele dia ou usar sistemas de rastreamento. Um rastreador é um dispositivo mecânico que segue a direção do sol em sua varredura diária através do céu. No entanto, os rastreadores são caros, e precisam de energia para o seu funcionamento e que nem sempre são viáveis. Portanto, muitas vezes é prático orientar o coletor solar com um ângulo de inclinação ótimo e daí corrigir a inclinação ao longo do tempo.

A Figura 2.12 resume o efeito global da variação da declinação solar, observada a cada ano ($+23,45^\circ$ a $-23,45^\circ$), no ângulo de incidência dos raios solares no equador. A figura mostra claramente que a melhor orientação para um painel FV (painel fotovoltaico) fixo instalado no equador é paralelo à superfície do solo (isto é, fixado na posição horizontal). A posição horizontal, ou próxima dela, é a mais correta

para os painéis fotovoltaicos, pois assim propiciará o máximo de captação da radiação solar ao longo do ano.

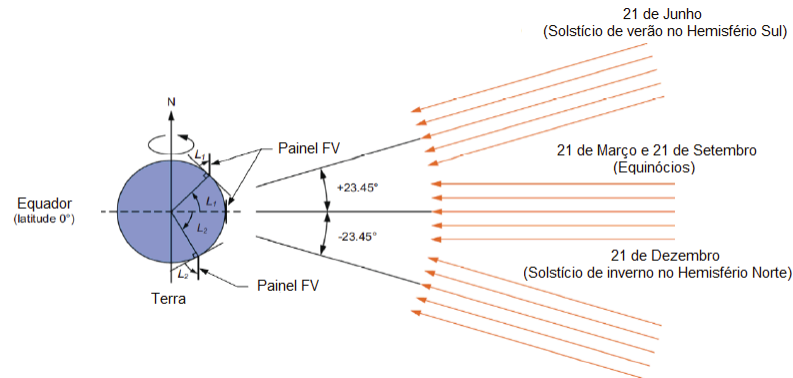


FIGURA 2.12: ORIENTAÇÃO ÓPTIMA DOS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS FIXOS INSTALADOS EM DIFERENTES LATITUDES.

FONTE: ADAPTADO DE LAB-VOLT LTD. (2009).

A Figura 2.12 mostra também um painel FV fixo colocado na posição horizontal (ótima) no equador, na latitude L_1 no hemisfério norte, e em latitude L_2 no hemisfério sul. O painel FV em latitude L_1 no hemisfério norte é inclinado para o equador (isto é, em direção ao Sul) com um ângulo em relação à superfície do solo que é igual à latitude L_1 . Da mesma forma, o painel FV em latitude L_2 no hemisfério sul é inclinado para o equador (isto é, em direção ao Norte) com um ângulo em relação à superfície do solo que é igual à latitude L_2 . Como resultado, os painéis fotovoltaicos nos hemisférios norte e sul têm a mesma orientação (com relação ao Sol) como o painel FV instalado na posição horizontal no equador. Isso garante que as superfícies dos painéis fotovoltaicos nos hemisférios norte e sul tenham o melhor alinhamento possível com os raios solares, e, assim, produzir a quantidade máxima de energia ao longo do ano (LAB-VOLT Ltd., 2009).

A partir da Figura 2.12, torna-se evidente que, para maximizar a produção anual de energia, qualquer painel FV instalado no exterior deve ser inclinado para o equador com um ângulo em relação ao solo que é igual à latitude a que o painel FV está localizado. Esta é a regra geral a ser seguida ao instalar painéis fotovoltaicos fixos. Para melhorar ainda mais a produção da energia através de painéis FV fixos, o ângulo de inclinação pode ser diminuído ligeiramente durante o verão e aumentado ligeiramente durante o inverno. Dito em outras palavras, o ângulo de inclinação poderia ser diminuído ligeiramente de Maio a Julho e aumentado ligeiramente de

Novembro a Janeiro. Por outro lado, para os painéis FV localizado no hemisfério sul, o ângulo de inclinação pode ser aumentado ligeiramente entre Maio a Julho e diminuído ligeiramente de Novembro a Janeiro. Finalmente, uma vez que o sol nasce no Leste e se põe no Oeste, a orientação de azimute de um painel FV fixo instalado no hemisfério norte deve ser em direção ao sul. Em contrapartida, no hemisfério sul deve ser voltado ao norte (LAB-VOLT Ltd., 2009).

2.9.3. Irradiação solar no Brasil

O potencial teórico fotovoltaico é calculado através do atlas da radiação solar, em combinação com equações que descrevem as estações do ano, horário do dia e variação geográfica da irradiação solar (DEWULF e LANGENHOVE, 2006). A irradiação global anual pode ser medida em Wh/m^2 e varia de modo significativo de acordo com as regiões, como pode ser observado no mapa de irradiação solar global média anual para o Brasil.

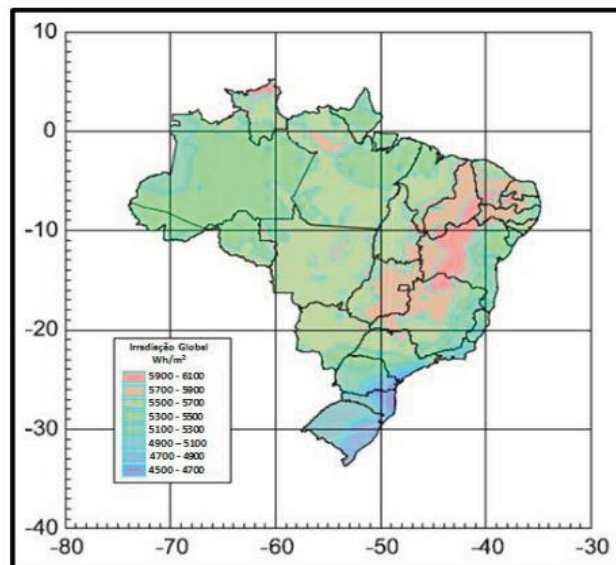


FIGURA 2.13: MAPA DE IRRADIAÇÃO GLOBAL-MÉDIA DIÁRIA ANUAL EM wh/m^2 dia.
FONTE: COLLE E PEREIRA (1998).

O mapa representado na Figura 2.13 mostra a média anual do total diário de irradiação solar global incidente no território brasileiro. Os índices de irradiação global apresentam médias relativamente altas em todo o país, apesar das diferenças climáticas entre as regiões.

As Figuras 2.14 e 2.15 mostram, respectivamente, a distribuição da média de irradiação global por regiões do Brasil, a irradiação média mensal e a variabilidade

da irradiação média diária para todo o território brasileiro e para a região sul. Consta-se a baixa variabilidade da irradiação diária em todo território do País em quase todos os meses do ano, o que é um dado importante para o aproveitamento energético.

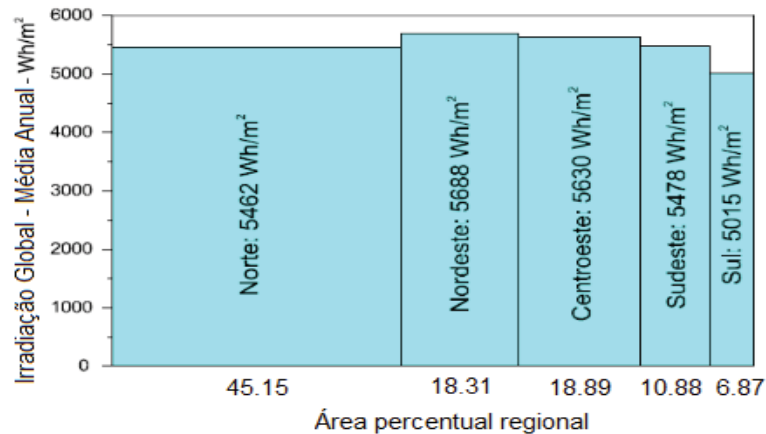


FIGURA 2.14: DISTRIBUIÇÃO DA MÉDIA DE IRRADIAÇÃO GLOBAL POR REGIÕES DO BRASIL.
 FONTE: INMET, (1998).

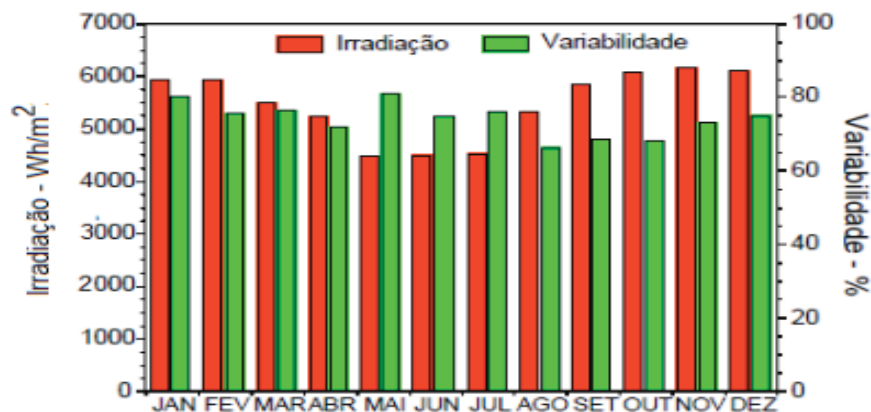


FIGURA 2.15: IRRADIAÇÃO MÉDIA MENSAL E VARIABILIDADE DA IRRADIAÇÃO MÉDIA DIÁRIA PARA TODO O TERRITÓRIO BRASILEIRO.
 FONTE: INMET, (1998).

2.9.4. Levantamento das características do local de instalação

Para evitar erro de produção, consumo de energia e cálculo do custo global do sistema fotovoltaico é fundamental avaliar as condições básicas existentes no local de instalação. O desempenho do conjunto de módulos solares fotovoltaicos pode ser influenciado por vários parâmetros, sendo a radiação solar o principal deles, já que depende fundamentalmente da localização geográfica da instalação, além de sua inclinação e orientação. A temperatura dos painéis, o sombreamento parcial, o

descasamento entre os painéis de um mesmo *string*, a resistência dos condutores e o estado de limpeza dos painéis, também são determinantes no rendimento do sistema (RÜTHER, 2004).

Como regra geral, a inclinação ótima em relação à horizontal para incidência solar máxima em regime anual é dada pela latitude local. A orientação ideal é a de uma superfície voltada para o equador (norte geográfico para instalações no hemisfério sul e sul geográfico para instalações no hemisfério norte) (FOSTER *et al.*, 2010). No entanto, em outras situações, onde não é possível seguir esta regra, também é possível atingir uma geração satisfatória.

Um painel fotovoltaico apresenta bom rendimento quando iluminado homogeneamente. Dado que na maioria dos módulos fotovoltaicos, as células solares individuais são conectadas em série, uma pequena sombra sobre uma das células, como a sombra projetada por uma antena, chaminé ou poste, por exemplo, pode reduzir acentuadamente o rendimento de todo o sistema. Isto se deve ao fato de que a célula sobre a qual incidir a menor quantidade de radiação é que irá determinar a corrente (e, portanto, a potência) de operação de todo o conjunto a ela conectado em série (RÜTHER, 2004).

Dentre os diversos tipos de sombreamento, podem ser citados: sombreamento temporário - resulta da presença de folhas, de dejetos de pássaros, pó e fuligem nas áreas industriais. A solução para este problema depende da eficiência no funcionamento do sistema de autolimpeza dos painéis, feito através da lavagem da sujeira pela água da chuva. Para que isto ocorra, os painéis devem ser colocados com um ângulo mínimo de inclinação de 12° (IST; DGS; UE, 2004). Sombreamento em consequência da localização - compreende todo o sombreamento produzido pelo envoltório do edifício, ou seja, prédios vizinhos, árvores, cabos da rede elétrica (IST; DGS; UE, 2004). Sombreamento produzido pelo edifício - são as sombras geradas pelo próprio edifício, como caixas d'água, antenas, para-raios, etc. (IST; DGS; UE, 2004).

2.10 POTENCIAL DA COLETA DE ÁGUA PLUVIAL

O potencial de aproveitamento de águas pluviais do telhado refere-se à capacidade que um telhado singular tem em captar as quedas de água no telhado

em um determinado ano que abranja todos os dias chuvosos. O rendimento anual de água é o produto do tipo de telhado e precipitação média anual de uma área.

O potencial de aproveitamento de águas pluviais (em L/ano) de um telhado pode ser estimado com base em precipitações locais (P , em mm/ano), a área de captação (A , em m^2) e o coeficiente de escoamento (C_r , *adimensional*, $0 < C_r \leq 1$), como é mostrado na equação (2.41):

$$S = P \cdot A \cdot C_r \quad [2.41]$$

A equação (2.41) inspira-se do método racional tradicionalmente usado para estimar a taxa de escoamento do pico de qualquer bacia hidrográfica (McCUEN, 2004; VIESSMAN & LEWIS, 2003).

O C_r estima a parcela de precipitação que se torna escoamento, levando-se em conta as perdas devido ao vazamento ou transborde, molhamento da superfície de captação e evaporação (SINGH, 1992). Assim, o C_r é útil para prever o potencial de escoamento da água numa superfície, que pode ser transmitida para um sistema de armazenamento.

Para avaliar o coeficiente de escoamento de diferentes tipos de telhados foram usados os índices de coeficiente de escoamento (C_r) genéricos de (RAMON *et al.*, 2011). O mesmo autor considera que para chuvas torrenciais frequentes, os valores de C_r dos telhados variam de 0.7 a 0.95, ver Tabela 2.1.

Estes valores são o resultado da interação de muitos fatores, tanto climáticos (tamanho e intensidade do evento chuva, umidade antecedente, ventos predominantes) quanto geométricos (inclinação, material do telhado, desnível da superfície do telhado, infiltração e rugosidade).

TABELA 2.1: ESTIMATIVA DE VALORES DE COEFICIENTE DE ESCOAMENTO C_r

Telhado	C_r	Referência
<i>Telhados (em geral)</i>	0.7 – 0.9	Pacey e Cullis (1989)
	0.75 – 0.95	ASCE (1969), McCuen (2004), Singh (1992), TxDOT (2009), Viessman e Lewis (2003)
	0.85	McCuen (2004), Rahman <i>et al.</i> (2010)
	0.8 – 0.9	Fewkes (2000)
	0.8	Ghisi <i>et al.</i> (2009)
	0.8 – 0.95	Lancaster (2006)

FONTE: ADAPTADO DE RAMON *et al.*, (2011)

O clima na área de estudo pode ser caracterizado como subtropical úmido com temperaturas de 25°C no verão e 15°C durante o inverno, com ocorrência ocasional de geadas durante as noites de junho e julho. A precipitação média anual é de 1571,28 mm e umidade média relativa do ar de 78,87% (IPPUC, 2006). Como se pode ver na Figura 2.16, as médias mensais da precipitação ao longo de todo ano são iguais ou superiores a 100 mm, a exceção de Abril e Agosto. Na série de 1931-2015 o total de precipitação anual só caiu para valores abaixo de 80 mm nos anos 1931 e 1985 (ver FIGURA 2.17).

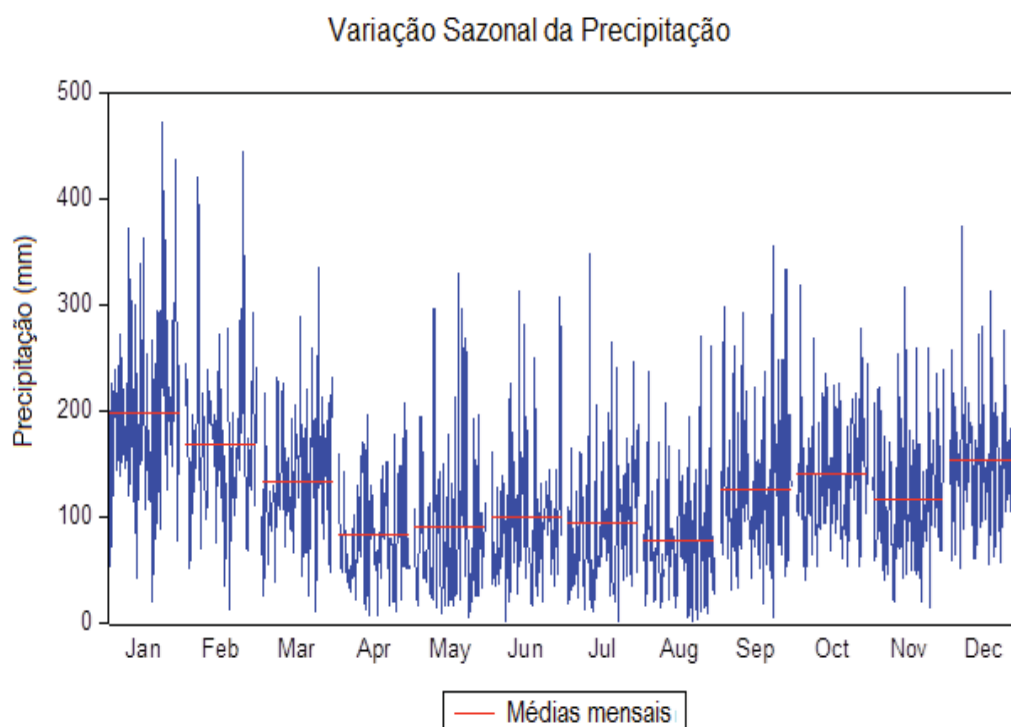


FIGURA 2.16: VARIAÇÃO SAZONAL DA PRECIPITAÇÃO NA REGIÃO DE ESTUDO, BASEADA NA MÉDIA DOS DADOS DA SÉRIE METEOROLÓGICA COMPREENDIDA ENTRE 1931-2015. INMET, CURITIBA-PR.

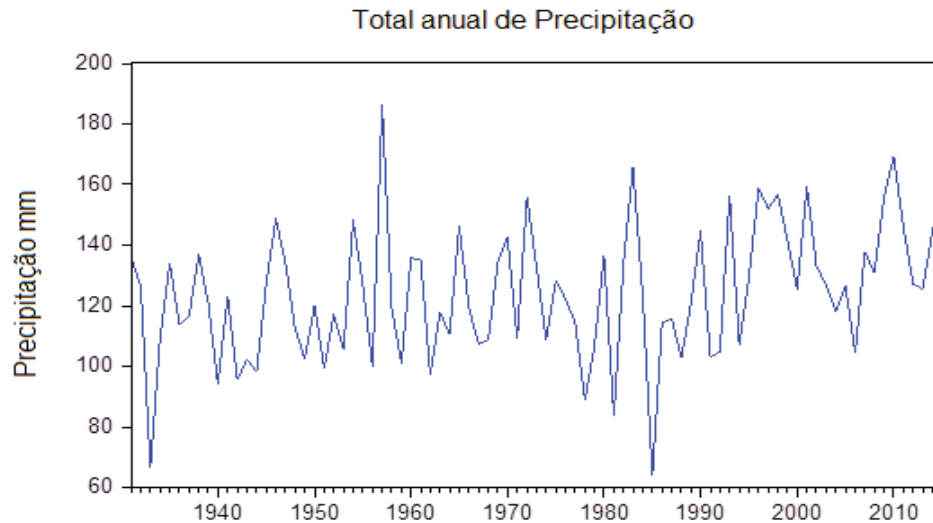


FIGURA 2.17: TOTAL ANUAL DOS VALORES DE PRECIPITAÇÃO NA REGIÃO DE ESTUDO, BASEADOS NA MÉDIA DOS DADOS DA SÉRIE METEOROLÓGICA COMPREENDIDA ENTRE 1931-2015. INMET, CURITIBA-PR.

2.10.1 Volume aproveitável de água de chuva em telhados com telhas cerâmicas

O cálculo do volume que seria aproveitado em um sistema de coleta de água de chuva depende principalmente da área da superfície interceptadora do telhado. O dimensionamento de um reservatório de acúmulo se baseia em dados referentes à área de cobertura e índice pluviométrico da região estudada. O volume médio diário de precipitação interceptada pode ser calculado com base na seguinte expressão:

$$V_p = \frac{P \times A \times C_r}{1000} \quad [2.42]$$

em que, V_p é volume de precipitação interceptado (m^3); P a precipitação média diária (mm); A a área de captação (m^2) e 1000 é o fator de conversão para m^3 .

O volume mensal de água de chuva que poderia ser aproveitado em cada telhado foi determinado considerando-se os dados de precipitação mensal, a área total de telhados e o coeficiente de escoamento (C_r). O coeficiente de escoamento corresponde à relação entre o volume escoado e o volume precipitado, podendo variar com a duração e com a intensidade da chuva. Neste trabalho optou-se por utilizar o coeficiente de escoamento igual a 0,8, visto que os telhados das casas onde foi feito o levantamento do voo, são de telha cerâmica.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são descritos os equipamentos usados para a coleta de dados, os softwares usados para o processamento e a área de estudo. Em seguida, é descrita em detalhes a metodologia adotada para atingir o escopo da pesquisa. Vale ressaltar que a metodologia proposta nesta pesquisa é justificável quando se trata de projetos de pequenas áreas como em tetos de edifícios e/ou estruturas singulares.

3.1 ÁREA DE ESTUDO

O levantamento de dados foi realizado em duas áreas. A primeira área de levantamento situa-se no campus do Centro Politécnico UFPR, em Curitiba. O segundo no Jardim Botânico da cidade de Curitiba. A Figura 3.1 apresenta a localização da área de estudo; nas janelas ampliadas, os retângulos a) e b) em vermelho ilustram os edifícios sobre os quais foi realizado o levantamento.



FIGURA 3.1: LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO, COM AMPLIAÇÃO DAS EDIFÍCAÇÕES LEVANTADAS.

3.2 MATERIAIS

3.2.1 Equipamentos e Softwares Computacionais

As imagens foram adquiridas com uma câmera PHANTOM VISION FC200 a bordo do UAV DJI PHANTOM 2 (FIGURA 3.2). A reconstrução da nuvem de pontos foi feita no VisualSFM enquanto que o redimensionamento da nuvem de pontos e a modelagem 3D foi efetivado no MatLab. A TABELA 3.1 lista o equipamento e o conjunto de softwares usados na presente pesquisa.

TABELA 3.1: PACOTE DE SOFTWARE E INSTRUMENTOS USADOS.

Software/Pacotes	Utilidade
Câmera PHANTOM VISION FC200 (Sony Exmor 1/ 2.8")	Aerofilmmagens da cena
VisualSFM	Geração da nuvem de pontos e cálculo da orientação da câmera
MatLab	Registo entre nuvens de pontos; remoção de ruídos; redimensionamento e segmentação do modelo; automatização de cálculos de área, orientação, inclinação das coberturas e potencial fotovoltaico e hídrico.

3.2.1.1 Descrição do UAV e da Câmera

As aerofilmmagens da área de estudo foram feitas usando uma câmera a bordo do quadricóptero UAV DJI Phantom 2, de asas rotativas (FIGURA 3.2).



FIGURA 3.2: QUADRICÓPTERO DJI PHANTOM 2 ALIMENTADO POR BATERIA ELECTRÓNICA. FABRICADO PELA DJI INNOVATIONS, É CAPAZ DE TRANSPORTAR UMA CARGA DE 300 g.

O quadricóptero UAV DJI Phantom 2 é de fabrico chinês a cargo da empresa *DJI Innovations*. A plataforma possui as seguintes características: envergadura de 50 cm; peso máximo para decolagem $\leq 1.3 \text{ kg}$; é alimentado por uma bateria de polímero de lítio de 5200 *mAh* e 11,1V com quatro LEDs. A bateria contém um circuito inteligente e um indicador de carga restante embutido, conferindo ao UAV uma autonomia de voo de 25 minutos com a bateria completamente carregada. A velocidade máxima de voo é de 15 m/s, sendo 6 m/s e 2 m/s as velocidades máximas de subida e descida respectivamente (www.dji.com). A Tabela 3.2 resume as especificações do DJI Phantom 2 usado para as aerofilmações.

TABELA 3.2: ESPECIFICAÇÃO DO QUADRICÓPTERO UAV DJI PHANTOM 2

Especificações	
Peso	$\leq 1.300 \text{ kg}$
Rotor	4 Hélices
Autonomia de voo	Até 25 min
GPS a bordo	Sim
Função especial	Automaticamente retorna ao local de origem (1º ponto)
Captura de dados	Usando o aplicativo para alcançar os <i>waypoints</i>
Controle de voo	Manual e autônoma
Suporte da câmara	Suporte da câmara flexível

FONTE: ADAPTADO DO MANUAL DO USUÁRIO DO DJI PHANTOM

O sistema é sensível ao vento, de modo que, para coleção de bloco de imagens controladas, é necessário que a velocidade do vento seja inferior a 15 km/h ($\approx 4 \text{ m/s}$). À velocidade de vento acima de 4 m/s, a plataforma perde drasticamente a sua estabilidade originando grandes ângulos de *pitch* e *roll*.

A plataforma é equipada com um sistema de piloto automático (controlador de vôo) embarcado, com uma bússola, um GPS, o sensor IMU e um transmissor em terra que juntos fornecem a posição e altitude da aeronave. O extensor *Wifi* incluído é capaz de capturar até 980 pés acima. O *Gimbal* motorizado - permite controlar o ângulo de inclinação da câmara e é manualmente controlável através do aplicativo *DJI Vision*. Uma câmara *Sony Exmor 1/2,8"* de 14MP com gravação de vídeo HD 1080p em cartão micro SD vem acoplada na plataforma e vinculado ao aplicativo *DJI Vision* para a realização de filmagens e tomada de fotos. O sistema a *FPV (First*

Person View) embutido, transfere vídeo ao *smartphone* (*iOS/Android*) através de *Wifi* (300m). A Tabela 3.3, ilustra as especificações da câmera a bordo do UAV.

TABELA 3.3: INFORMAÇÕES SOBRE A CÂMERA E O SENSOR.

Especificações	
Câmera	PHANTOM VISION FC200
Sensor CCD	Sony Exmor 1/2,8"
Comprimento do CCD (w)	5,714 mm
Altura do CCD (h)	4,286 mm
Máxima resolução	4384 (w) x 3288(h)
Formato das Imagens	JPEG e RAW
Ifov (°)	140

3.3 METODOLOGIA

A metodologia começa com o planejamento de voo com o quadricóptero DJI Phantom 2, passa pela geração da nuvem de pontos SfM, a modelagem da cena e termina com a avaliação da aplicação prática do modelo gerado.

3.3.1 Voos com o quadricóptero DJI PHANTOM 2

Do estudo do UAV e do manual do fabricante, foi possível distinguir três principais (e não exclusivos) modos de voos. Dentre os quais os voos nos modos (1) autônomo, (2) assistido e (3) voos sem GPS.

3.3.1.1 Voos no modo autônomo

Nos voos no modo autônomo, também denominados de voos no módulo GPS, o operador deverá programar o sistema de forma que o equipamento cumpra as especificações previstas no planejamento do voo, levando em consideração as limitações do equipamento.

As faixas de voo são configuradas no programa *DJI Vision* no módulo *GroundStation* instalado em um sistema operacional *Android* ou *iOS* e por meio de sinal de rádio controle e de rede *Wifi* própria do sistema de controle do Phantom Vision 2. A trajetória de voo planeja-se usando a função *waypoint*, com isso o quadricóptero executa as faixas de voo de forma autônoma numa sequência pré-definida de posições (posição GPS, altura e direção). A ativação desse modo é feita

através do rádio controle ou na própria programação de voo, no aplicativo *DJI Vision*. Também através do rádio controle, o comando da rota pode ser alternado entre manual onde o operador comanda o UAV ou autônomo e o UAV volta à trajetória programada interrompida. Para a realização deste tipo de voo é seguro que o sistema se conecte a pelo menos 6 satélites.

Voos realizados neste modo com o DJI Phantom 2 resultaram que o quadricóptero foi bastante instável, não obedecia a rota pré-programada, e se comportava de forma irregular, o que nos obrigou a abortar imediatamente. Adiante, pesquisas realizadas no manual do equipamento, mostram que o DJI Phantom 2 apresenta uma configuração para o ângulo de orientação da Bússola (*Compass*) embarcado no quadricóptero, correspondente ao Hemisfério Norte, em virtude de ser esta a localização do país do fabricante e origem do equipamento, a China. Portanto para solucionar o problema de instabilidade seria necessário realizar um ajuste no ângulo da bússola para o Brasil (Hemisfério Sul), ato que estava fora do escopo deste trabalho.

3.3.1.2 Voos no modo assistido

O modo assistido, também denominado modo controlado, é normalmente utilizado quando se tratar de alvo dinâmico e necessita do acompanhamento do operador, o qual deverá desenvolver habilidades exigidas pelo modo, incluindo conhecimento da legislação pertinente e conhecimento das limitações do equipamento, tais como: tempo de permanência no ar; altura e distância de voo; raio do alcance do rádio controle; sinais de alerta; alterações climáticas; conhecimentos dos sensores embarcados e tempo de carga das baterias. Para alvos estáticos, mesmo com um operador experiente controlando o sistema, tentando voar duas linhas de voo paralelas, sem estabilização é praticamente impossível voar uma configuração de blocos precisos. Neste trabalho foi usado o modo de voo assistido para as aerofilmagens devido a dificuldades experimentadas durante os voos autônomos.

Outra razão tem a ver de que o modo de voo assistido é propício quando se trata de áreas particularmente apertadas e de acesso condicionado, pois permite que sejam feitas mudanças rápidas de rumo e altitude. Outrossim, o modo de voo

assistido permite antecipar provável problema e reagir mais rapidamente em caso de falha do sistema durante o voo. Foi adotado como procedimento de segurança manter de vista o drone durante toda a aerofilmagem.

3.3.1.3 Voos no modo sem GPS

Neste modo, o operador controla manualmente o drone, por isso requer muita habilidade e experiência, já que não há controle automático de posição. O operador controla o tempo todo contra o vento e deve responder a qualquer influência indesejada por este. Isto requer muito cuidado e manuseio seguro do controle do drone. É recomendado que o controle direto do ângulo de horizontalidade pelo *joystick* deve ser usado apenas por operadores experientes e aplicadas apenas em casos excepcionais. Utiliza-se este modo como um procedimento excepcional, apenas no caso de um sinal de GPS inexistente ou muito ruim, tornando-se a única maneira de voar em cenários onde um início sem o sinal de GPS é inevitável. Neste caso, o drone irá executar a decolagem e continuar o rastreamento do sinal GPS em voo.

Em todos os outros modos, o apoio ao voo é baseado em um bom sinal de GPS.

3.3.2 Planejamento e realização de voos para aquisição de dados

O relatório da ISPRS (2008-2012) fornece uma breve orientação para aquisição de imagens em voos aéreos. Segundo o relatório em alusão, para o planejamento de voos com câmeras digitais devem ser levados em conta os seguintes parâmetros: altura, GSD, escala, velocidade da aeronave, pontos de controle, pontos de paragem, pontos de aquisição de imagem, pontos de cruzamentos, distância focal, recobrimentos, ponto de início e final de uma linha de voo e ponto de retorno. Toda filmagem foi feita com a distância focal fixada para o infinito e o GSD tomado a partir da equação (3.1).

$$\frac{f}{H} = \frac{\text{Tamanho do pixel}}{GSD} \quad [3.1]$$

Onde H é a altura acima do solo, f a distância focal da câmera e GSD a resolução espacial, que corresponde ao tamanho do pixel no terreno.

O relatório sugere ainda que o planejador leve em considerações os seguintes itens:

- Visitar várias vezes a área a fim de conhecer as limitações do voo em termos de espaço físico disponível, obstáculos naturais e artificiais que margeiam a área e se a área é restringida e ou especial;
- Saber das condições do equipamento;
- Levar em conta as limitações para a navegação (ventos, carga útil, autonomia do voo, navegação autônoma ou assistida);
- Planejar sempre com uma margem de segurança;
- Considerar as dimensões apropriadas das áreas a serem recobertas, levando em consideração comportamento em mais de uma faixa, recobrimentos longitudinal e lateral, nível de voo, obtenção das imagens, ponto de parada;
- Tomar informações meteorológicas do dia do voo para decidir se a missão é executável, pois as vibrações levam a um consumo adicional de energia e redução do tempo disponível de voo, isso sem considerar que afetará a qualidade das imagens.

Micheletti *et al.*, 2014 resumem os pontos chaves a serem considerados quando se captura imagens a serem processados pela abordagem SfM, que incluem:

1. Capturar toda a cena em primeiro lugar, e depois os detalhes. Garantir que oclusões são capturadas de forma adequada;
3. Assegurar a cobertura adequada, ou seja, cada ponto sobre a cena deve aparecer em pelo menos três imagens adquiridas a partir de diferentes locais;
4. A cena deve ser estática e todos os detalhes necessários devem ser capturados;
5. Luz consistente. O uso de flash cria com frequência texturas incoerentes na imagem que podem confundir o processo de *feature* e *matching*;
6. Evitar exposição excessiva e imagens subexpostas;
7. Evitar imagens borradas - normalmente decorrentes de baixa velocidade do obturador e/ou movimento de câmera;
8. Evitar superfícies transparentes, refletoras ou homogêneas.

Na aquisição de dados para reconstrução SfM é requerido que as imagens contenham certas características específicas, (80% de sobreposição longitudinal e 60% de lateral, oclusões adequadas, captura de todos os detalhes, etc.) o que se afigura difícil conseguir um conjunto de imagens satisfatórias na primeira tentativa de captura seja manual ou automatizada (com obturador). Para contornar este problema, utilizou-se um vídeo para realizar a captura das imagens. Um vídeo é uma sequência de imagens, capturadas e reproduzidas a uma velocidade constante que transmite noção de movimento (FILHO; 2011). Cada imagem é denominada de *frame*. O *frame* é, segundo Aumont e Marie (2003), cada um dos quadros ou imagens fixas de um produto audiovisual. Filho (2011), explica que, ao capturar um fluxo constante de imagens (ou seja, um vídeo), tem-se um maior número de imagens em sequência, aumentando as possibilidades de captura de nuances importantes sobre o objeto ou cena a ser reconstruída, garantindo assim, a possibilidade das imagens serem muito semelhantes. Isto porque, normalmente, o movimento de câmera é mais linear, sem mudanças abruptas de ponto de vista, características essenciais para uma reconstrução realizada com o método SfM.

Para tal, foram planejados e efetuados dois voos. No primeiro a câmera foi alinhada perpendicularmente ao trajeto de voo (Experimento 1), reduzindo o número de transectos necessários para cobrir a área. No segundo, as aerofilmagens foram tomadas a partir de visada nadiral (Experimento 2).

Todas as aerofilmagens foram gravadas em forma de vídeo 1080p a 24fps e depois importados para o *Free Video to JPG Converter*, onde foi exportado como imagens, a uma taxa de um quadro por segundo. A sobreposição entre as imagens foi tal que cada *frame* fosse visível em pelos menos três fotografias consecutivas. A triagem das fotografias foi visual sob critério de que a melhor aproximação das faces do telhado, portanto do modelo, seria conseguida escolhendo fotografias que cobrissem a maior parte da cena. As imagens foram então importadas para o VisualSfM para criar uma nuvem de pontos.

3.3.3 Processamento de Imagens

Dois tipos de softwares são geralmente utilizados para processamento de imagens: softwares de fotogrametria e softwares de visão computacional (*Computer*

Vision Software). Exemplos de softwares de fotogrametria são o *Leica Photogrammetry Suite* (LPS) e o *PhotoModeler*. A abordagem fotogramétrica começa com a calibração da câmera, seguido da identificação de pontos de controle do terreno (GCP) e investigação de *tie points* (pontos de ligação) de modo automático ou manual, dependendo do software (SONA *et al.*, 2014). Os GCPs são pontos de coordenadas no terreno conhecidos que facilitam georreferenciamento. Adicionalmente, *tie points* identificados pelo software apoiam o processo. Em seguida, a orientação exterior da imagem é estimada com base em orientação interior da imagem previamente conhecida. A orientação exterior é definida por coordenadas X, Y, Z e rotação em torno dos três eixos (conhecidos por: *roll*, *pitch* e *yaw*) da plataforma a partir da qual se adquire as imagens (ABER *et al.*, 2010). *Roll* (φ) é igual à rotação em torno do eixo X, *pitch* (ω) em torno do Y e *yaw* (κ) a rotação em torno do eixo Z. A orientação interior da imagem é definida pela distância focal, localização do ponto principal, três coeficientes de distorção radial e dois coeficientes distorção tangencial. Finalmente, realiza-se um ajuste de feixes, e a orientação de um bloco de imagem (REMONDINO *et al.*, 2014).

A abordagem baseada em algoritmos de visão computacional abarca softwares para processamento de imagens UAV. Os softwares de processamento fotogramétrico desenvolvidos para imagens UAV têm um alto grau de automatização, maior que na fotogrametria convencional. O uso de softwares de visão computacional possibilita o processamento de uma grande quantidade de imagens embora eles imponham limitação quanto ao tamanho. São ainda mais rápidos e mais fáceis de usar, para a geração de produtos tipo *raster*, com um controle menor sobre algumas etapas de processamento e na precisão dos parâmetros geométricos. Os resultados de processamento com softwares de visão computacional são comparáveis com os da abordagem fotogramétrica (SONA *et al.*, 2014). Pacotes de software disponíveis e desenvolvidos especificamente para conjunto de imagens e dados de levantamentos por UAV incluem os comerciais, como o *PhotoModeler Scanner*, o Pix4D e o *Agisoft PhotoScan Professional* e os de código aberto, como o *3DF Samantha*, *Bundler APERO* e *VisualSFM*.

O *VisualSFM* é um programa que usa a abordagem SfM para reconstruir objetos em 3D usando um conjunto de imagens. É tido como uma ferramenta SfM

rápida, poderosa (Wu, 2013), com interface flexível, desempenho estável e produz melhores resultados quando comparado com outros softwares SfM como *Bundler* ou *Insight3D*. O VisualSfM não é uma solução totalmente *open source*. Algumas partes do programa, tais como o algoritmo de triangulação que calcula as posições iniciais dos pontos 3D são fechadas. Mesmo assim, é amplamente utilizado em pesquisas de reconstrução 3D. Esse leque de vantagens motivou a escolha deste software para o uso nesta pesquisa. Outra característica que fez o VisualSfM adequado para este trabalho é o fato deste fornecer interfaces para densificação do modelo a partir da execução das ferramentas PMVS/CMVS (SNAVELY, 2008; FURUKAWA; PONCE, 2010; WU, 2013; TOA *et al.*, 2015) e permitir exportar o modelo para outros softwares.

A capacidade de gerar nuvens de pontos 3D SfM de alta qualidade semelhantes às geradas pelo LiDAR agora é amplamente entendida e demonstrada em vários estudos (FONSTAD *et al.*, 2013; Mancini *et al.*, 2013) O sucesso da SfM é regido pela resolução da imagem (que, por sua vez, depende da qualidade da câmera e da lente usada), o grau de sobreposição da imagem, bem como o movimento relativo da câmera em relação à cena (WESTOBY *et al.*, 2012). Isso faz com que os micro UAVs sejam a plataforma ideal para a SfM porque operam a distâncias de apenas algumas dezenas de metros acima do solo, fornecendo dados com resolução espacial sub-decimétrica - ordens de magnitude mais finas que os sensores espaciais com a capacidade de resolver árvores individuais E plantas para estimativa de biomassa (WATTS, *et al.*, 2012)

O sistema VisualSfM junto com os projetos que integra (SfM GUI, SiftGPU, PMVS/CMVS) são patenteados pelo que não existe uma vasta informação sobre cada. Tanto quanto se sabe, ele é uma reimplementação do SfM (SIFT, PBA e CMVS). Ainda assim é possível compreender o funcionamento e objetivo de cada um. Ao longo do trabalho estão descritos os principais.

O VisualSfM compreende quatro processos principais. O primeiro passo lê os dados de entrada que são fotos; em seguida, essas fotos são computadas e feita a correspondência. Os dois últimos processos geram a nuvens de pontos.

Para o processamento, as imagens são carregadas no VisualSfM como entrada. Numa primeira etapa, as imagens estão alinhadas umas com as outras. O alinhamento é executado usando o algoritmo SfM (ULLMAN, 1979). O SfM reconstrói a geometria tridimensional da cena a partir de uma sequência de imagens tomadas por uma câmera que se desloca ao redor da cena correspondente (SZELISKI, 2010).

O algoritmo detecta semelhanças geométricas, como bordas de objetos, denominados pontos característicos da imagem, e, posteriormente, monitora sua deslocação em torno de toda a sequência de imagens. Em seguida, são obtidas uma série de potenciais correspondências.

Usando este conjunto de correspondências como entrada, o SfM calcula a localização desses pontos de interesse e torna-os como uma nuvem de pontos 3D esparsa que representa a geometria da cena em um quadro de coordenadas local. A posição da câmera e os parâmetros da orientação interior são também recuperados (HARTLEY; ZISSERMAN, 2003; SZELISKI, 2011). Assim, não há necessidade de calibrar a câmera durante a fase de aquisição de imagens (QUAN, 2010).

A orientação automática de imagens em SfM é basicamente dependente da detecção de pontos homólogos nas imagens sobrepostas. O SfM baseia-se no cálculo da matriz fundamental ($F_{i,j}$) e RANSAC (HARTLEY; ZISSERMAN, 2004) o qual é comparável com a orientação relativa estéreo com coplanaridade em fotogrametria (MCGLONE *et al.*, 2004).

A correspondência de imagem é calculada a partir de uma correspondência de todas as imagens contra todas, onde é calculada a árvore de conectividade correspondente. No entanto, estas técnicas não só são dispendiosas em termos de tempo de cálculo, mas também vulneráveis a problemas de falhas para correspondência.

As falhas do SfM podem ser analisadas como resultado de várias causas, entre elas, o efeito repetitivo de padrões ou simetrias na arquitetura da cena (KOSECKA; ZHANG 2010; COHEN *et al.*, 2012; WILSON; SNAVELY, 2013). Os padrões repetitivos podem induzir a erro de conectividade entre as imagens. Outra causa das falhas no SfM é o fraco planejamento no posicionamento da câmera ao redor da cena.

Após bem-sucedido o passo da orientação da imagem com SfM, aplica-se a correspondência densa. O algoritmo de correspondência densa tenta estabelecer um número máximo de correspondências *pixel-a-pixel* em duas imagens (HIRSCHMULLER, 2008; FURUKAWA; PONCE, 2009). A correspondência densa precisa de uma boa percentagem de sobreposição e similaridade entre as imagens.

Da primeira etapa de processamento resulta: (1) Uma nuvem de pontos esparsa (FIGURA 3.3 esquerda) - a nuvem de pontos esparsa é calculada a partir da informação sobre os pontos característicos da imagem; (2) Orientação exterior da imagem - as posições da câmera calculadas são iguais a orientações exterior da imagem; e (3) Orientação interior da imagem.

Na segunda etapa, a geometria da cena detalhada é construída em ajustamento por feixes usando algoritmos de visualização múltipla estereoscópica (MVS) (SCHARSTEIN; SZELISKI, 2002). Nesta fase, todos os pixels são usados para reconstruir os detalhes da cena. Em seguida, a geometria tridimensional é representada (FIGURA 3.3 direita) em uma malha de coordenadas locais (BENDIG, 2015). O software calcula as posições de câmera no momento de tomada das imagens e os parâmetros intrínsecos da câmera.

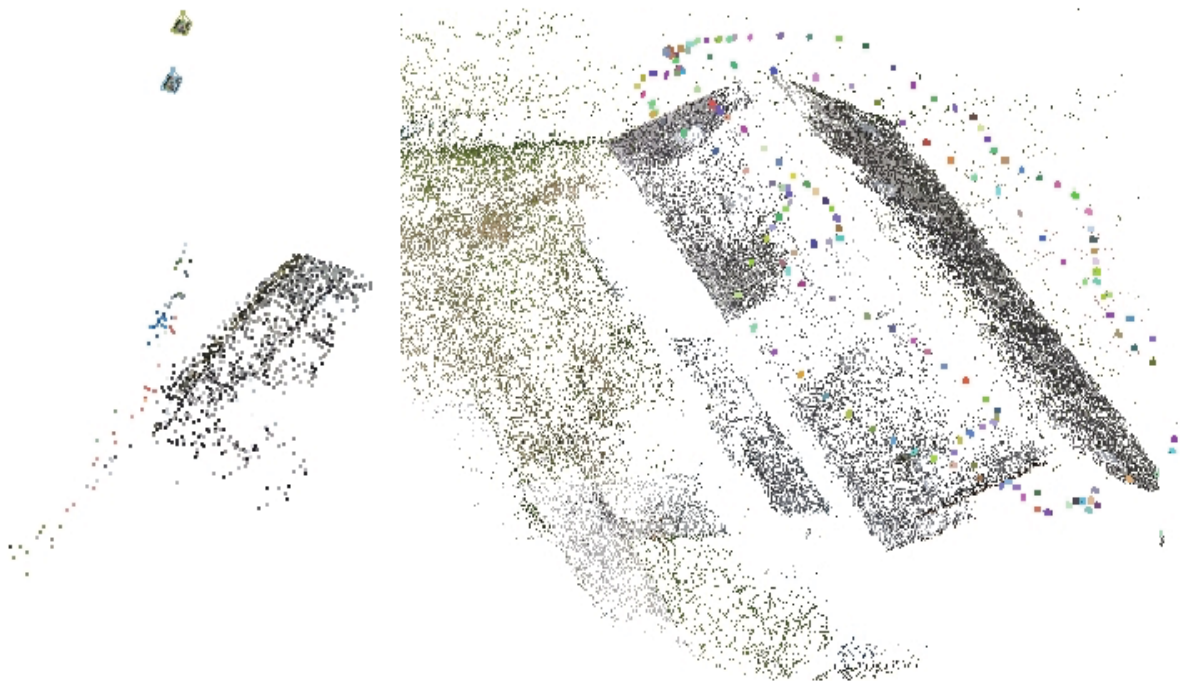


FIGURA 3.3: A ESQUERDA, OBJETO REPRESENTADO POR NUVEM DE PONTO ESPARSA; A DIREITA, A MESMA CENA REPRESENTADA COMO NUVEM DE PONTOS DENSA COM POSIÇÕES DA CÂMERA.

A Figura 3.4 resume as principais etapas metodológicas aplicadas a este trabalho. O passo referente à calibração não foi testado, avaliou-se o modelo considerando a calibração efetuada pelo software VisualSfM.

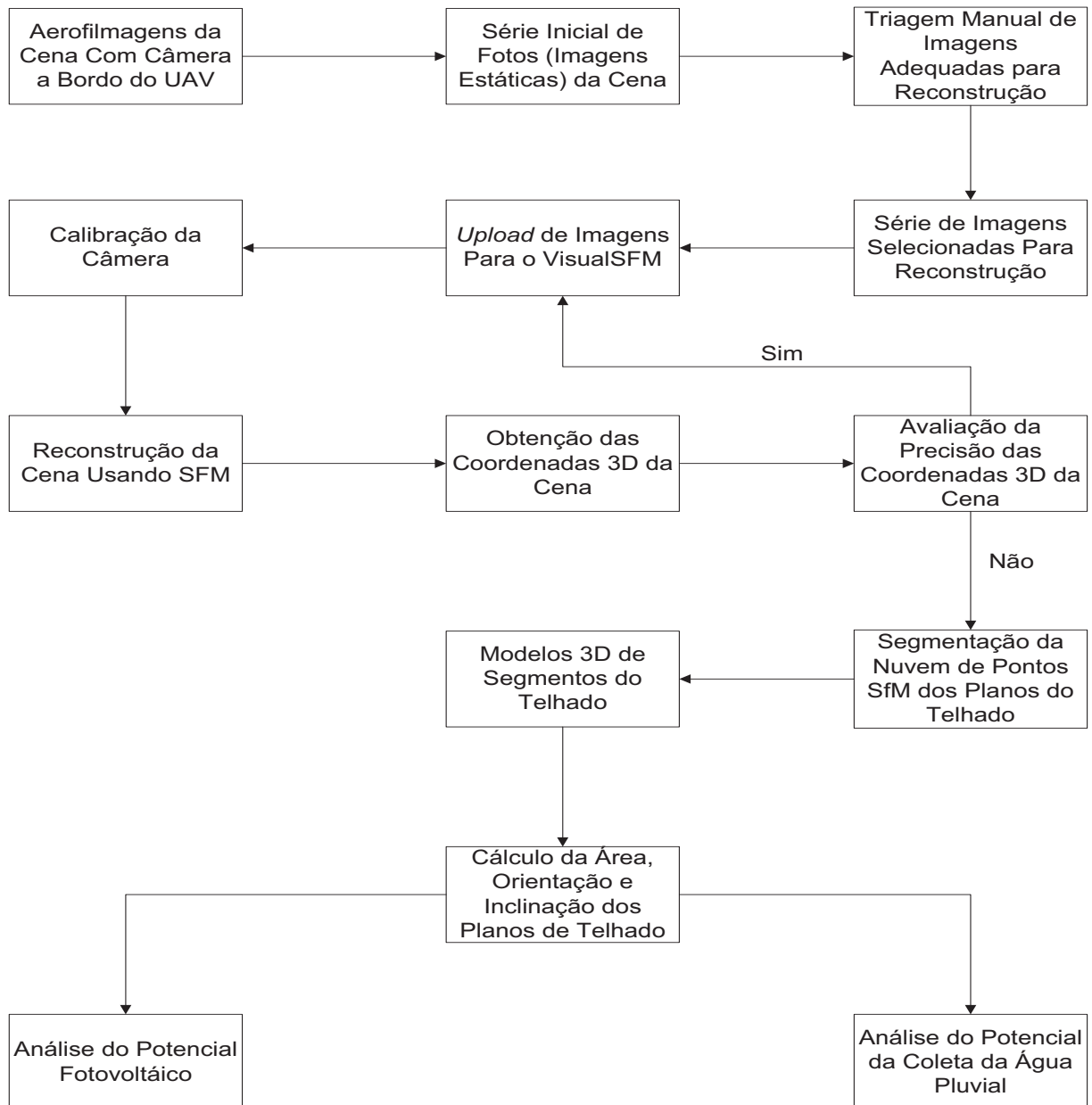


FIGURA 3.4: ROTEIRO METODOLÓGICO DA PESQUISA

3.3.4 Geração de modelos 3D com base na abordagem SfM

Após a seleção manual das imagens, elas são importadas para o VisualSfM. Feito o carregamento das imagens, segue a fase da reconstrução do modelo que é baseada na abordagem SfM. Esta abordagem compreende as seguintes etapas: na

primeira etapa é realizada uma correspondência de feições entre as imagens consecutivas, através de extração de feições e da correspondência baseadas no SIFT. A abordagem transforma uma imagem numa série de vetores de características locais em que cada um é invariante à translação, escala, rotação da imagem e parcialmente invariante às alterações na luminosidade e a projeções tridimensionais. Dentro deste processo, todos os pontos instáveis são filtrados/removidos usando o RANSAC. A segunda etapa estima a localização dos pontos 3D e os parâmetros através da determinação das posições ótimas da câmera usando o *bundle adjustment*. Uma nuvem de pontos esparsa (menos densa) é gerada. Para aumentar ainda mais o nível de detalhe na nuvem de pontos, é aplicado o PMVS, resultando em uma nuvem de pontos com alta densidade. A saída do VisualSFM é uma nuvem de pontos densa, as coordenadas do centro câmera em sistema arbitrário, a distância focal e o ponto principal. A abordagem permite salvar o modelo no formato “ply”.

3.3.5 Modelagem do telhado

Para identificar os telhados, a abordagem usada neste trabalho baseia-se na análise da declividade local dentro de uma triangulação de Delaunay. A triangulação de Delaunay apresenta uma característica particular que garante que cada triângulo que faz parte da triangulação de Delaunay é formado a partir de três pontos configurados de tal forma que o círculo que passa pelos três pontos é vazio, ou seja, não contém nenhum outro ponto. Embora este conceito possa ser estendido a três dimensões, neste trabalho apenas uma triangulação bidimensional é usada, projetando os pontos no plano horizontal. A triangulação de Delaunay calculada a partir dos pontos do telhado fornece informações a respeito da proximidade entre pontos (tamanho das arestas) e a relação de vizinhança entre eles. Pontos vizinhos são interligados por um triângulo.

Da malha de Delaunay, é feita a busca por bordas (procura por pontos externos), de modo que a triangulação agora apresente somente as bordas. A busca por bordas se justifica pelo fato da nuvem SfM ser irregular, ou seja, os pontos nas bordas nem sempre estão alinhados. Dessa forma as bordas se tornam como uma envolvente do conjunto da nuvem de pontos. Uma vez que o limite (as bordas) do telhado é determinado, os pontos interiores são usados para modelar a estrutura de

telhado. Isso se faz usando a função *freeBoundary* do *MatLab*. Assim, primeiramente é determinado o vetor normal da superfície de cada triângulo fazendo com que cada um dos triângulos interiores tenha um vetor normal associado. O menor autovetor é utilizado para estimar o eixo principal do telhado. Todos os vetores normais são comparados com seus vizinhos. Se a diferença angular for menor que um limiar, as normais são agrupadas e rotuladas. A média de cada agrupamento indica os planos de telhado com a mesma orientação.

Não é necessário que todos os triângulos dentro de uma região de telhado tenham vetores normais ao agrupamento - apenas o suficiente para detectar o plano. Estes agrupamentos são então usados para identificar segmentos planares de um telhado. O processo é sumarizado como se segue:

Partindo de um triângulo “semente”, se os vetores normais da semente e do triângulo vizinho tiverem orientação semelhante, estes dois triângulos são combinados. A região continua a crescer enquanto a diferença de ângulo entre dois triângulos adjacentes não exceda um dado limiar. O vetor normal à superfície de referência é recalculado utilizando os vetores normais de todos os triângulos que pertencem a região. Um novo triângulo semente é escolhido quando a região pára de crescer. O crescimento de região termina quando todos os triângulos forem agrupados como faces de telhados. Os erros nos dados SfM podem levar à detecção de triângulos isolados nas regiões de planos de telhado. Para contornar isso, pequenas regiões podem ser fundidas com as regiões vizinhas que apresentam o vetor normal mais próximo. A Figura 3.5 ilustra a extração dos planos, onde se visualiza o ângulo entre triângulos adjacentes (FIGURA 3.5a) e a condição de coplanaridade entre os triângulos (FIGURA 3.5 b e c).

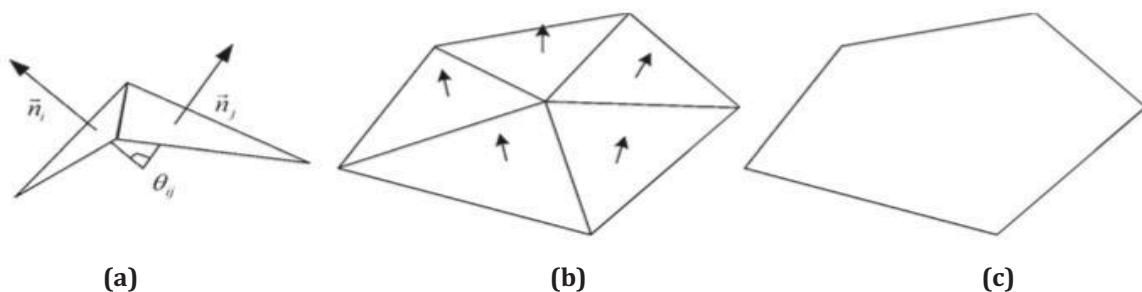


FIGURA 3.5: ILUSTRAÇÃO DA EXTRAÇÃO DOS PLANOS. (a) ÂNGULO ENTRE TRIÂNGULOS ADJACENTES (b) TRIÂNGULOS COM VETORES NORMAIS E (c) RESULTADO DO CRESCIMENTO DE REGIÃO POR TRIÂNGULO.

3.3.6 Segmentação dos planos do telhado

Uma vez que cada face do telhado é agrupada em planos diferentes, são determinados os coeficientes que descrevem cada superfície no sistema de coordenadas cartesianas a partir da equação geral do plano (equação (3.2)). Cada agrupamento descreve uma família de planos dada pela equação:

$$Ax + By + Cz + D = 0 \quad [3.2]$$

onde A , B e C são as componentes do vetor normal ao plano, e D é o termo independente.

Para o caso da edificação com telhados de duas águas (FIGURA 3.6a) a interseção dos planos de telhados adjacentes resultante é uma reta. Uma reta no espaço euclidiano é determinada por dois pontos, por um ponto e seu vetor diretor ou pela intersecção entre dois planos. No último caso, se pode obter uma equação matemática através da intersecção de duas faces planas, cujos atributos são representados, neste caso, por planos de telhados adjacentes. Uma edificação do tipo telhado de duas águas é definida por dois telhados adjacentes, cujos planos π_1 e π_2 são definidos pela equação geral do plano,

$$\begin{aligned} A_1x + B_1y + C_1z + D_1 &= 0 \\ A_2x + B_2y + C_2z + D_2 &= 0 \end{aligned} \quad [3.3]$$

Para uma situação em que se tem um telhado de 4 “águas” (FIGURA 3.6b), a interseção dos planos de telhados adjacentes resultante é um ponto. As equações dos planos são dadas por:

$$\begin{aligned} A_1x + B_1y + C_1z + D_1 &= 0 \\ A_2x + B_2y + C_2z + D_2 &= 0 \\ A_3x + B_3y + C_3z + D_3 &= 0 \\ A_4x + B_4y + C_4z + D_4 &= 0 \end{aligned} \quad [3.4]$$

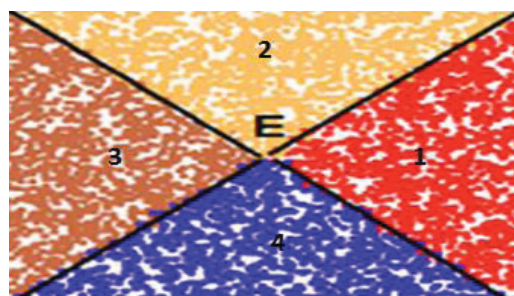


FIGURA 3.6: VISTA SUPERIOR DO TELHADO DE EDIFÍCIO DE 4 “ÁGUAS”

$$\text{Fazendo: } X = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}; \quad A = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 & C_1 \\ A_2 & B_2 & C_2 \\ A_3 & B_3 & C_3 \\ A_4 & B_4 & C_4 \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad L = \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \\ D_4 \end{bmatrix}$$

A equação (3.4) pode ser escrita na forma:

$$AX + L = 0 \quad [3.5]$$

O vértice E (FIGURA 3.6b), é determinado ao resolver simultaneamente as equações dos planos correspondentes. No caso em apreço dispõe-se de mais equações do que incógnitas. A solução da equação (3.5) demanda o uso do modelo paramétrico de ajustamento:

$$A^T \cdot A \cdot X = -A^T \cdot L \Rightarrow X = -(A^T \cdot A)^{-1} A^T L \quad [3.6]$$

3.3.7 Avaliação da qualidade dos resultados usando dados lidar derivados

3.3.7.1 Registro dos pares de nuvens de pontos 3D

O processo de registro consiste basicamente em determinar os parâmetros de transformação entre pares de nuvens de pontos 3D visando estabelecê-los em um único sistema referencial. Isto garante condições de mapeamento entre qualquer ponto no sistema referencial de coordenadas da nuvem de referência e seus pontos correspondentes na nuvem de pesquisa e vice-versa (SIMON, 1996). Chen e Medioni (1991) afirmaram que duas nuvens de pontos são ditas registradas quando uma delas é posicionada e orientada corretamente em relação à outra. Esta solução somente pode ser encontrada se for estabelecido um número suficiente de pontos correspondentes e através de um modelo de otimização e um método de estimativa de parâmetros, tal como o MMQ (método dos mínimos quadrados).

Assim, o processo de registro envolve duas principais etapas: estimativa dos parâmetros de registro e aplicação da transformação. A estimativa dos parâmetros é realizada através da relação entre feições correspondentes entre duas nuvens de pontos. Essas feições correspondem a pontos, linhas e superfícies planas extraídas de cada nuvem de pontos. A transformação aplicada é a transformação afim 3D, onde são definidas as rotações, translações, fator de escala e fatores de não ortogonalidade entre os eixos dos sistemas de coordenadas das nuvens SfM a LiDAR.

As coordenadas da nuvem de pontos SfM estão dadas num referencial arbitrário. Elas foram transformadas para o referencial do LiDAR. O referencial LiDAR tem como origem o centro do espelho de varredura do sistema de perfilamento a laser, e a orientação é definida pelo eixo “x” igual à direção de voo, o eixo “z” positivo em direção ao solo, e o eixo “y” tornando o sistema dextrogiro. Na equação (3.7) é apresentada a transformação afim na forma parametrizada para o caso 3D. Os parâmetros dessas transformações são estimados por meio do método dos MMQ, para maiores detalhes sobre este método sugere-se Gemael (1994)

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} dX \\ dY \\ dZ \end{bmatrix} \quad [3.7]$$

Na equação (3.7) $a, b, c, \dots, i, dX, dY, dZ$ representam os parâmetros da transformação afim 3D, X', Y' e Z' representam as coordenadas após aplicar a transformação sobre as coordenadas originais X, Y, Z .

A fim de materializar o registro, pontos nos cantos ao redor de uma “água” de cada uma das edificações são manualmente coletados na nuvem SfM e os homólogos na LiDAR, após aplicada filtragem de dados espúrios e segmentação automática de planos (Figura 4.3). Dado que o modelo da nuvem de pontos SfM é gerado fora de escala e não se encontra orientado, nesta fase é introduzida a informação métrica de controlo.

Feita a transformação, para avaliar a qualidade da nuvem de pontos SfM e a eficiência do registro é calculada a distância ponto a plano. Para tal, foi feita a triangulação de Delaunay da nuvem LiDAR que é tomada como base.

Terminada esta fase foi calculada a distância ponto (SfM) a plano (LiDAR). Para a determinação desta distância, partiu-se da suposição segundo a qual: Dado um ponto P e um plano π , a distância entre P e o plano π (indicada por $d(P, \pi)$) é definida como a menor distância possível entre P e um ponto do plano π . O ponto do plano que se situa à menor distância de P é aquele que se encontra na interseção da reta passando por P que é perpendicular ao plano (FIGURA 3.7). Assim, se A é um ponto qualquer de π , então $d(P, \pi)$ é o módulo da projeção ortogonal do vetor \overline{AP} sobre o vetor normal ao plano (π).

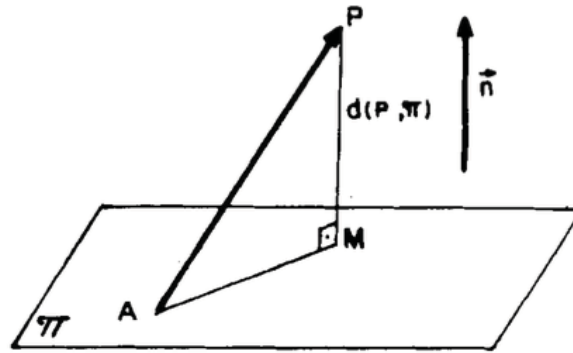


FIGURA 3.7: VETOR NORMAL A UM PLANO
 FONTE: BOULOS, (2005)

Sendo assim, o processo resume-se no seguinte: Escolha um ponto A de π e projete ortogonalmente \overline{AP} sobre um vetor \vec{n} normal a π . A norma dessa projeção é a distância $d(P, \pi)$ denotado como (BOULOS, 2005):

$$d(P, \pi) = \left\| \text{proj}_{\vec{n}} \overline{AP} \right\| = \frac{|\overline{AP} \cdot \vec{n}|}{\|\vec{n}\|} \quad [3.8]$$

Refira-se ainda que o valor de $d(P, \pi)$ pode ser positivo ou negativo, pelo que esta expressão poderá ser empregue para determinar de que lado de um plano se encontra qualquer ponto P .

Finalmente a média das discrepâncias e o RMS entre os dois modelos também são calculadas.

3.3.8 Cálculo dos valores da orientação, inclinação e área para cada telhado

Conhecidas as componentes A , B e C da equação geral do plano que correspondem aos valores do vetor unitário normal ao plano, denotado por \vec{n} (equação 3.9), o passo subsequente é o cálculo dos valores da orientação e inclinação para cada telhado.

A orientação da superfície é encontrada no cálculo do ângulo formado pela projeção do vetor \vec{n} no plano horizontal e o eixo y (equação 3.10). O quadrante ao qual pertence o ângulo é identificado por meio da avaliação do sinal dos componentes A e B do vetor unitário (FIGURA 3.8a) e permite obter o ângulo da orientação da superfície do telhado (FIGURA 3.8b).

$$\vec{n} = (A, B, C) \quad [3.9]$$

$$\beta = \arctan\left(\frac{A}{B}\right) \quad [3.10]$$

Nas equações acima, \vec{n} é o vetor normal ao plano; β é o ângulo entre a projeção horizontal do vetor normal e o eixo Y (norte). A B e C são parâmetros da equação geral do plano.

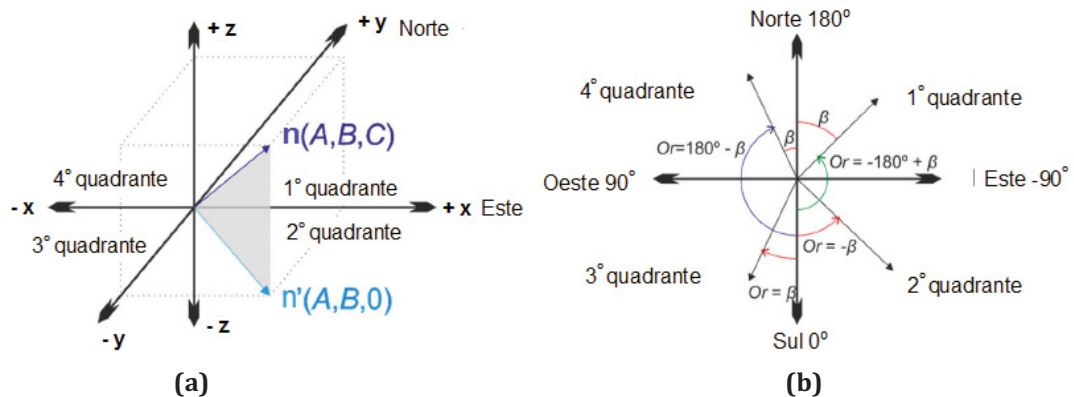


FIGURA 3.8: DETERMINAÇÃO (a) DO QUADRANTE A PARTIR DOS COMPONENTES DO VETOR NORMAL AO PLANO. (b) ORIENTAÇÃO ABSOLUTA DO TELHADO, DENOTADA COMO "Or", A PARTIR DO ÂNGULO ENTRE A PROJEÇÃO DO VETOR NO PLANO HORIZONTAL E O EIXO Y.

FONTE: ADAPTADO DE LÓPEZ-FERNÁNDEZ *et al.* (2015)

A inclinação da superfície é calculada por um processo trigonométrico simples em um triângulo retângulo em que o vetor normal é a hipotenusa e a sua projeção no plano horizontal (d) e o valor C são os catetos adjacente e oposto, respectivamente, (FIGURA 3.9), equações (3.11 - 3.13).

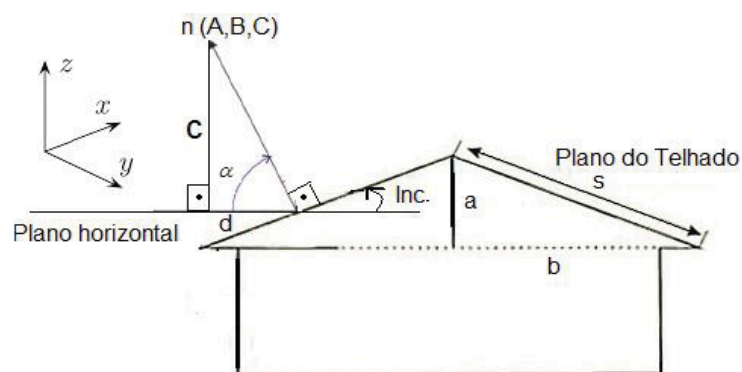


FIGURA 3.9: ÂNGULO DE INCLINAÇÃO A PARTIR DOS VALORES DO VETOR NORMAL DO PLANO.

$$d = \sqrt{A^2 + B^2} \quad [3.11]$$

$$\alpha = \arctan\left(\frac{C}{d}\right) \quad [3.12]$$

$$\text{inclinação} = 90^\circ - \alpha \quad [3.13]$$

Onde d é o módulo do vetor \vec{n} projetado no plano horizontal; α é o ângulo entre o plano horizontal e o vetor normal da superfície; Inc representa a inclinação do plano.

No cálculo da área, visualizado na Figura 3.9, utiliza-se primeiramente o teorema de Pitágoras, descrito pela equação (3.14).

$$s^2 = a^2 + b^2 \quad [3.14]$$

Sendo:

s: aresta da face inclinada do telhado (plano do telhado);

a: diferença de altura entre o ponto mais alto e mais baixo do telhado;

b: distância entre um ponto central da aresta da borda e um ponto central da aresta que divide as “águas” do telhado.

Depois de obtido os valores das dimensões das arestas, calcula-se a área, conforme o formato do telhado (triângulo, retângulo, quadrado, etc.).

3.3.9 Análise geométrica e classificação

Uma vez que os diferentes planos dos telhados são segmentados, suas áreas, inclinações e orientações são analisadas a fim de realizar a classificação geométrica. Os telhados com uma área menor do que o necessário para a instalação de painéis solares e aqueles com orientação sul são descartados por não oferecerem potencial para o aproveitamento da energia solar, devido à baixa insolação. Assim, apenas os telhados com orientação para norte aceitando uma faixa de variação de 45° ao leste ou ao oeste foram tidos como ideais para produção fotovoltaica.

Para a estimativa da coleta de água pluvial, todos os telhados foram tomados como potenciais, pois a orientação do telhado não é determinante para uma estrutura de captação de água de chuva.

A análise da distribuição espacial dos planos do telhado é focada em quatro passos aplicados individualmente a cada superfície. (i) projeção da nuvem de pontos em relação ao plano horizontal, a fim de avaliar as superfícies em 2D, simplificando

o processo; (ii) extração dos pontos que descrevem a área da superfície a avaliar; (iii) cálculo da declividade e; (iv) Re-projeção da nuvem no espaço 3D.

3.3.10 Estimativa da radiação solar

A partir da orientação, inclinação e área é calculado o potencial fotovoltaico.

Primeiramente, é calculada a duração do dia para a cidade de Curitiba, usando-se a declinação do Sol no inverno ($23,5^\circ$) e no verão ($-23,5^\circ$), através das equações (3.15 e 3.16).

$$H_n = \cos^{-1}[-\tan(\varphi) \times \tan(\delta)] \quad [3.15]$$

$$H_o = \cos^{-1}[\tan(\varphi) \times \tan(\delta)] \quad [3.16]$$

Sendo H_n e H_o os ângulos horários no nascer e no pôr do Sol respectivamente; φ a latitude e δ a declinação do sol. Então, a duração do dia é dada pela equação (3.17).

$$D = |\overline{H_n} - \overline{H_o}| \quad [3.17]$$

Sendo: D a duração do dia.

A seguir, o ângulo M da face escolhida do telhado deverá ser calculado, através da fórmula descrita pela equação (3.18).

$$M = \tan^{-1}\left(\frac{\tan(Az)}{\sin(\varphi)}\right) \quad [3.18]$$

Sendo: Az : azimute do telhado e φ : latitude.

Na sequência, são usados os valores da declinação do Sol no inverno e no verão (para a cidade de Curitiba). O ângulo tocante ao Sol no inverno e no verão é calculado utilizando os valores de declinação, através da equação (3.19):

$$H_t = \cos^{-1}\left(\frac{\cos(M) \times \tan(\delta)}{\tan(\varphi)}\right) \quad [3.19]$$

Sendo: H_t : ângulo tocante ao Sol; M : ângulo auxiliar e δ : declinação do Sol na estação.

A partir dos dados obtidos, a insolação da face do telhado é calculada, pela equação (3.20):

$$I_s = H_o + H_t \quad [3.20]$$

I_s : Insolação e H_o : ângulo horário do pôr do Sol.

Assim, para calcular o potencial fotovoltaico, o valor utilizado foi 5000Wh/m², obtido do Atlas de irradiação Solar do Brasil para a região Sul. O valor aproximado para a geração de energia em um dia é dado pela equação (3.21):

$$P_f = 5000 \times I_s \quad [3.21]$$

P_f : potencial fotovoltaico (Wh/m² dia);

Para a obtenção de um cálculo preciso, com a equação (3.22), calcula-se a potência instalada no sistema fotovoltaico, considerando o silício policristalino (p-Si) como material utilizado no módulo do painel fotovoltaico.

$$P_m = \eta \times E \times A_{disp} \quad [3.22]$$

Sendo: P_m : Potência instalada no sistema (kWp); η : eficiência do módulo (%);
 E : potencial fotovoltaico gerada pelo sistema (kWh/dia); A_{disp} : Área de cobertura disponível (m²).

4 RESULTADOS E DISCUSÃO

Para a pesquisa foram realizados dois levantamentos. O primeiro foi efetuado numa edificação de duas “águas” para a obtenção dos resultados iniciais utilizados para a comprovação da metodologia desenvolvida doravante denominada de Experimento 1. O segundo foi realizado numa casa de quatro “águas”, que passa a ser denominada de Experimento 2. As duas nuvens de pontos foram comparadas com as nuvens de pontos das mesmas cenas obtidas com o laser scanner aerotransportado.

4.1 PLANEJAMENTO DE VOOS E AQUISIÇÃO DE DADOS

O voo foi planejado e realizado considerando as limitações do UAV (FIGURA 3.2). O planejamento de voo foi executado com base nos princípios fotogramétricos aéreos clássicos (ISPRS, 2008-2012), mas adaptado a estratégias dos algoritmos SfM (MICHELETTI *et al.*,2014), assegurando a aquisição de imagens com 80% de sobreposição longitudinal e 60% de lateral.

Os voos foram realizados no modo assistido, o qual, quando ativado, o *drone* só se move na direção indicada pelo operador, tornando o manuseio mais fácil e, acima de tudo, seguro. O equipamento, no modo assistido, foi conduzido a posições diversas para onde a cena necessitava de ser fotografada inúmeras vezes, em ângulos e distâncias variadas. Este modo de voo mostrou-se eficaz em relação aos demais modos de voo.

A fim de garantir adequadamente a sobreposição, foram tomados filmes gravados em forma de vídeo 1080p a 24fps e a velocidade aproximada de voo do UAV foi de 30 km/h. Como resultado, os vídeos cobrindo todos os detalhes foram de 3 minutos para o experimento 1 e 4 minutos para o experimento 2. Da conversão dos vídeos em imagens, resultou em 174 aeroimagens consideradas adequadas para a geração da nuvem de pontos para o primeiro experimento e 152 aeroimagens para o experimento 2. A altitude de voo sobre o solo foi de aproximadamente 15 m e 18 m, resultando em GSD de 4,5 mm e 5,4 mm para os experimentos 1 e 2, respectivamente.

Na Figura 4.1 é ilustrado o recobrimento aerofotogramétrico onde a rota do UAV e as poses da câmera durante as aerofilmas são assinaladas por meio de triângulos (coloridos).

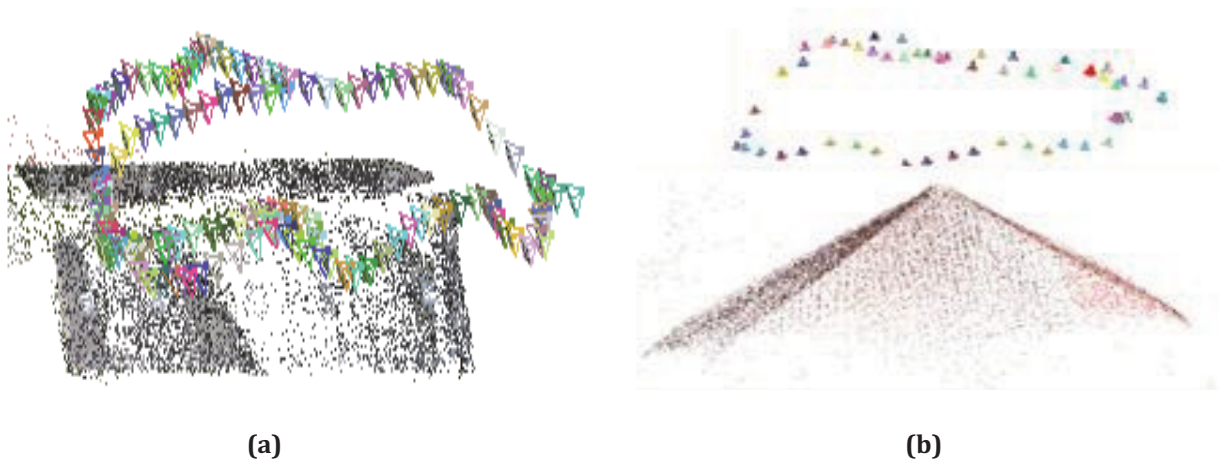


FIGURA 4. 1: (a) e (b) NUVEM DE PONTOS COM AS POSES DA CÂMERA PARA OS EXPERIMENTOS 1 E 2 RESPETIVAMENTE.

Em seguida procedeu-se à geração da nuvem de pontos que compreendeu a produção de um modelo esparso e à reconstrução densa.

4.2 GERAÇÃO DA NUVEM DE PONTOS COM BASE NA ABORDAGEM SfM

As imagens foram processadas de acordo com a abordagem SfM obtendo como resultado nuvem de pontos densa.

Primeiro, o SfM identificou pares de imagens e criou uma nuvem esparsa (Figura 3.3). Em seguida, uma nuvem com maior densidade de pontos com escala e dimensões arbitrárias foi criada com base nos pares identificados e na nuvem esparsa. É também interessante notar que os pontos 3D sobre o gramado foram computados. Na sequência detalhes espúrios foram filtrados. O processo de filtragem teve como propósito a eliminação dos pontos tridimensionais que não pertencem ao plano que define o telhado da edificação, tais como: pontos sobre lareiras, antenas, chaminés, etc. O processo de filtragem e o recorte foi manual e foi efetivada no ambiente MatLab. A nuvem de pontos SfM recortada e filtrada é mostrada na Figura 4.2.

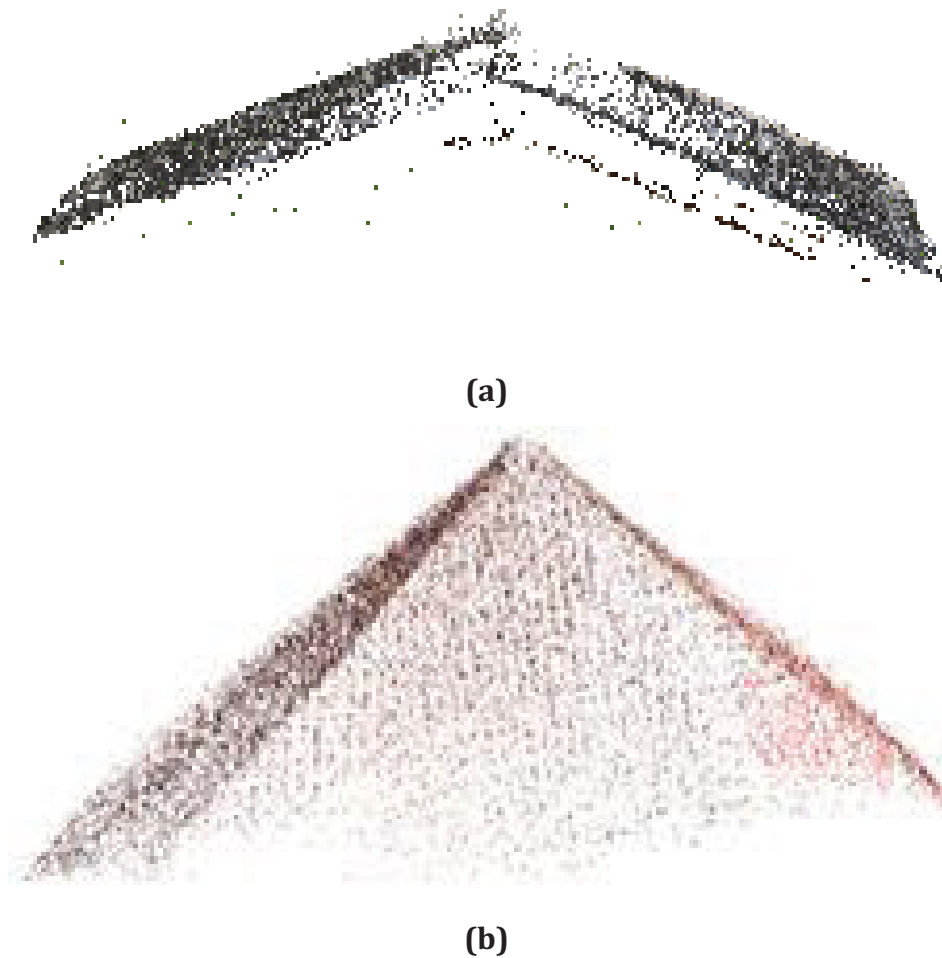


FIGURA 4.2: NUVENS DE PONTOS RECORTADAS PARA O EXPERIMENTOS 1 (a) E 2 (b).

No modelo da nuvem de pontos SfM (Figura 4.2) é evidente uma tendência de curvatura das faces dos telhados. Tal pode ser explicado pelo facto de que não tivemos em conta a remoção da distorção causada pela lente “olho de peixe” da câmara o que pode ter tido a consequência deste efeito de distorção se ter manifestado no modelo. Esse efeito poderia ser corrigido calibrando a câmara, fase não incluída na presente metodologia.

Do ponto de vista métrico, o modelo encontra-se fora de escala e não se encontra orientado. Isto resulta do facto de não ter sido introduzida nenhuma espécie de informação de controlo no processo. Porém, isso poderá ser facilmente ultrapassado em fase posterior através da introdução de informação métrica de controlo.

Tanto no experimento 1 (com a câmara alinhada perpendicularmente ao

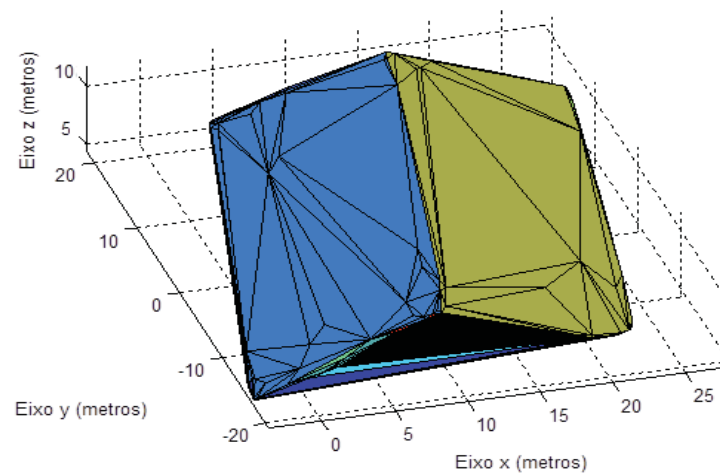
trajeto do voo) como no 2 (com a câmera na visada nadiral) foi gerada nuvem de pontos SfM densa com 31.864 pontos e 59.715 pontos respectivamente. Porém, a nuvem de pontos não tem densidade uniforme, havendo áreas com falhas (lacunas), ou seja, sem pontos. A não uniformidade de cada uma das nuvens de pontos se deve a textura repetitiva no telhado (efeito repetitivo de padrões), textura mais fraca e simetrias na sua arquitetura (KOSECKA; ZHANG 2010; COHEN *et al.*, 2012; WILSON; SNAVELY, 2013). Texturas repetitivas podem conduzir a erros, tais como pontos flutuantes acima da superfície. Alguns pontos da cobertura uniformes são mal texturizados, e como consequência nenhum ponto 3D é computado. Outra fonte de erros é a instabilidade da plataforma UAV. A utilização de fotos tiradas a várias alturas, pontos de vistas diversos e iluminação variável representa também um problema dado que a conjugação de diferentes condições de iluminação cria texturas incoerentes na imagem que podem confundir o processo de *feature* e *matching*, provocando resultados incongruentes na reconstrução do modelo da nuvem de pontos.

Em suma na nuvem de pontos do experimento 1, houve mais falhas na cumeeira do telhado enquanto no experimento 2 as falhas estão mais evidentes nas bordas do telhado.

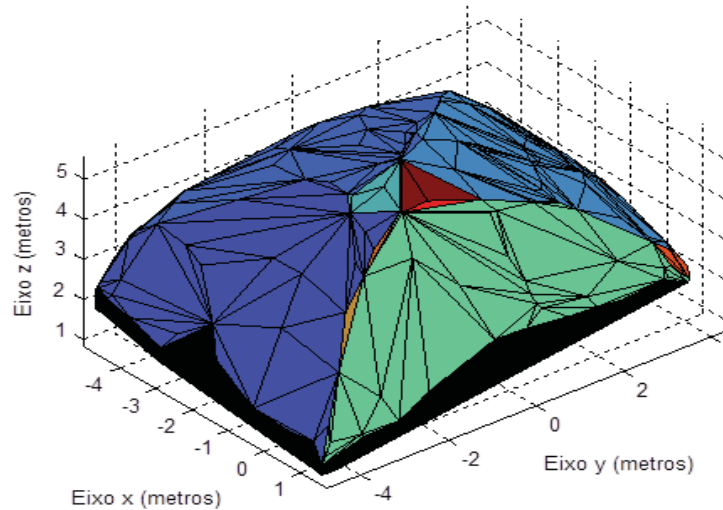
4.3 RECONSTRUÇÃO DAS FACES DO TELHADO

Após o recorte das nuvens de pontos no MatLab, seguiu a modelagem das superfícies dos telhados (FIGURA 4.3). Nela se visualiza o agrupamento de triângulo em cada face do telhado encontrado a partir dos seus vetores normais. Na Figura 4.3a podem ser vistos dois agrupamentos de triângulos classificados em igual número de planos do telhado. Na Figura 4.3b é ilustrado quatro agrupamentos de triângulos classificados em quatro faces do telhado.

O telhado do experimento 1 foi modelado usando um limiar de diferença angular igual a 20°. Já para o experimento 2 a diferença angular que melhor classificou foi de 35°. Mesmo com essa diferença angular são notórios erros na cumeeira do telhado onde foram detectados triângulos isolados nas regiões de planos de telhado.



(a)



(b)

FIGURA 4.3: MODELO DO TELHADO MOSTRANDO O AGRUPAMENTO DOS TRIÂNGULOS PARA OS EXPERIMENTOS 1 (a) E 2 (b).

4.4 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA NUVEM DE PONTOS

4.4.1 Registo entre nuvens de pontos SfM e LiDAR

O registo de nuvem de pontos foi realizado com a finalidade de transformar os dados adquiridos do sistema de coordenadas SfM (sistema arbitrário) para o da nuvem LiDAR. O registo de ambas as nuvens foi realizado pelo ajustamento usando a transformação afim 3D cujos parâmetros da transformação são estimados por meio do MMQ.

Tomou-se seis pontos extremos nos cantos das superfícies dos telhados para o experimento 1. No experimento 2 selecionou-se cinco pontos sendo quatro nos

cantos dos telhados e um na cumeeira. O ponto da cumeeira (FIGURA 4.4b) foi obtido através da solução da equação (3.6). O mesmo número de pontos (homólogos) foi tomado para cada experimento na nuvem LiDAR da cena correspondente. A Figura 4.4 apresenta as nuvens SfM com os pontos escolhidos nos cantos dos telhados.

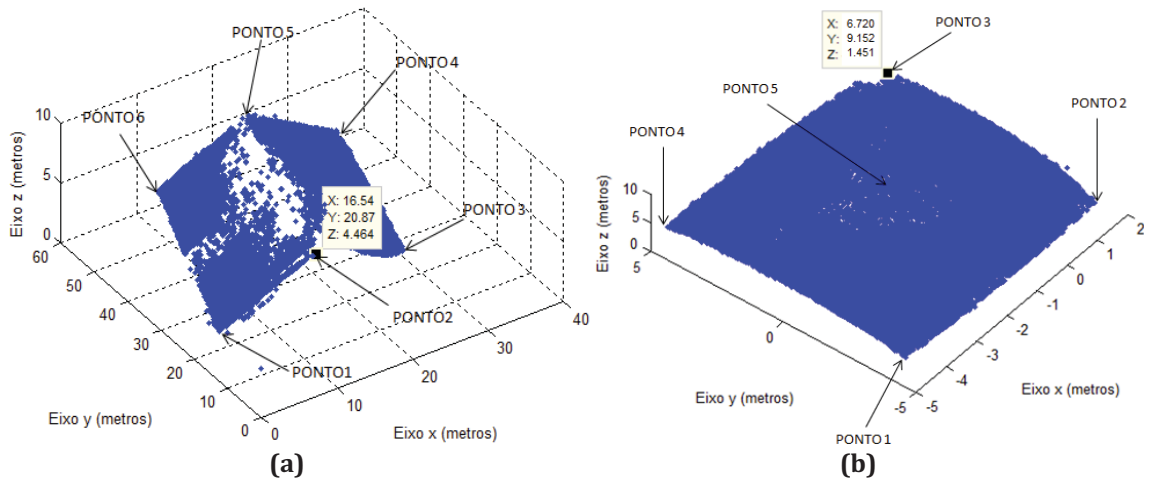


FIGURA 4.4: NUVEM DE PONTOS 3D SfM COM OS PONTOS ESCOLHIDOS NAS SUPERFÍCIES DO OBJETO PARA OS EXPERIMENTOS 1 (a) e 2 (b).

A Figura 4.5 (a) e (b) ilustra as nuvens LiDAR e SfM combinadas para o primeiro e o segundo experimentos respectivamente. O registro é aplicado em um par de nuvens de pontos que recobrem uma mesma cena.

Da análise visual da Figura 4.5 (a) e (b) atesta-se que a primeira foi melhor alinhada. Porém, nas duas nuvens registradas, as maiores falhas são visíveis nas bordas e na cumeeira dos telhados.

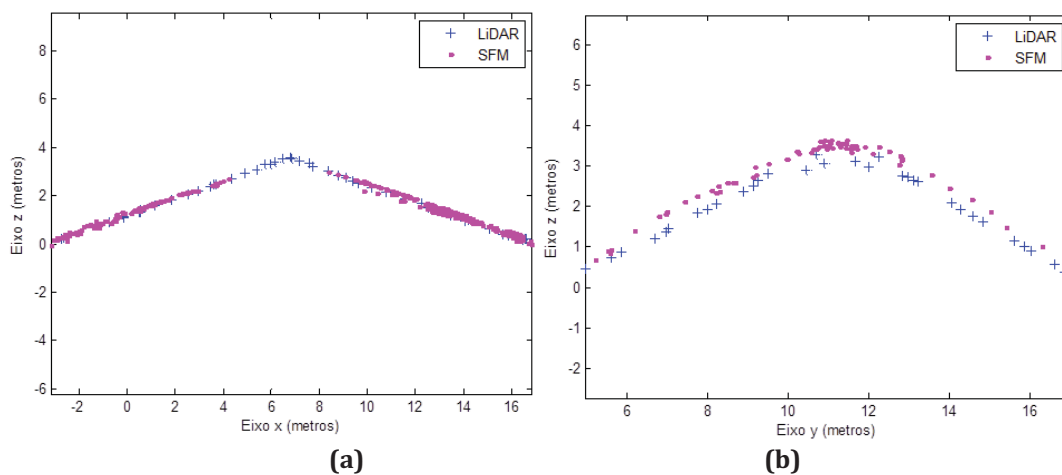


FIGURA 4.5: PERFIL DE TELHADOS REGISTRADOS ENTRE NUVENS SfM E LiDAR.

É possível constatar na figura 4.5b a discrepância entre os pontos da faixa SfM (pontos magneta) em relação aos demais. Na figura 4.5a os pontos magneta (pontos da faixa SfM transformados) estão mais próximos dos pontos em azul (pontos da faixa LiDAR). Pode ser verificado nos dois pares de nuvens de pontos que após a transformação a faixa SfM está acima à faixa LiDAR, sendo que tal é devido a distorção da lente. O registro realizado pelo método proposto reduziu as discrepâncias entre as faixas adjacentes, compatibilizando os dois conjuntos de dados.

Os parâmetros encontrados na transformação são apresentados na Tabela 4.1

TABELA 4.1. PARÂMETROS DA TRANSFORMAÇÃO AFIM 3D.

	Transformação afim 3D	
	Experimento 1	Experimento 2
No de Pontos	6	5
X^T (m)	0,8194	1,7699
Y^T (m)	0,1640	0,5439
Z^T (m)	-0,0233	-0,0011
a	-7,2650	-0,0325
b	-0,2426	-0,7289
c	0,8171	1,2428
d	0,0596	0,2793
e	-9,3087	4,8754
f	-0,0362	0,0981
g	-0,0062	-0,1530
h	0,8452	1,0199
i	-0,7705	-0,6619

Na Tabela 4.2 são apresentadas as discrepâncias dos pontos de apoio. De uma forma global, avaliando os valores de RMS, o experimento 2 apresentou melhores valores de discrepâncias relativamente ao experimento 1. Em contrapartida, a distância média ponto a plano para o experimento 1, resultou em 0,016 m contra 0,11 m do experimento 2.

Entenda-se que o aumento da distância média do experimento 1 para o 2 deve-se associar a baixa taxa de alinhamento, que é devido ao menor número de pontos correspondentes utilizados no registro, o que faz existir um grande número de pontos sem correspondência e com isso, a distância média aumenta. Apesar da

distância média entre os pontos correspondentes e o número de pontos correspondentes fornecerem uma ideia da qualidade do alinhamento, uma inspeção visual é sempre necessária para determinar o melhor resultado. Aliás, Takimoto *et al.* (2011) já comentava que apenas a distância média em pontos correspondentes e o número de pontos correspondentes não podem ser utilizados para avaliar a qualidade do registro.

TABELA 4.2. DISCREPÂNCIAS DE PONTOS DE APOIO PARA OS PONTOS DA NUVEM LiDAR E SfM.

Experimento	Nº Ponto	DifX (m)	DifY (m)	DifZ (m)	RMS (m)
1	1	0,60	0,87	0,11	1,06
	2	-0,68	-0,99	-0,12	1,20
	3	0,19	0,40	0,05	0,44
	4	0,56	0,68	0,08	0,88
	5	-0,55	-0,67	-0,08	0,87
	6	-0,12	-0,29	-0,04	0,32
2	1	0,03	-0,02	-0,05	0,07
	2	-0,03	0,02	0,05	0,06
	3	0,03	-0,02	-0,05	0,07
	4	-0,03	0,02	0,05	0,06
	5	-0,00	0,00	0,01	0,01

A Figura 4.6 mostra os histogramas representando a distribuição dos desvios padrão das distâncias entre as duas nuvens. Por estes histogramas nota-se que a maior parte dos pontos apresentou diferenças ao entorno do zero. Os valores dos resíduos para o primeiro histograma (Figura 4.6a) têm média de -0,017 m, variância 0,021 e desvio padrão de 0,146. O desvio padrão de 0,146 mostra que os dados estão menos dispersos, ou seja, estão melhor alinhados e com isso há maior proximidade entre os pontos das nuvens. Para o segundo histograma (Figura 4.6b), os resíduos resultaram em 0,011 m de média, 0,342 de variância e 0,585 de desvio padrão o que indica que, ao contrário do experimento 1, neste os pontos estão dispersos. A maior tendência de curvatura no modelo do experimento 2 é a principal causa deste erro.

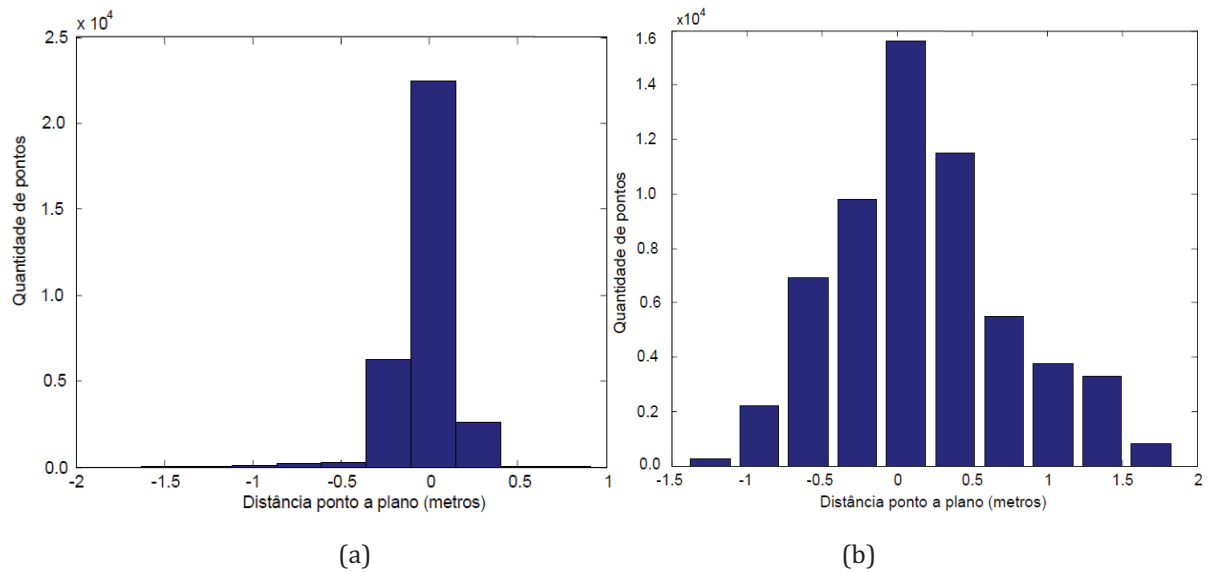


FIGURA 4.6: HISTOGRAMA DOS RESÍDUOS

4.4.2 Cálculo das dimensões das arestas na nuvem de pontos SfM

A tabela 4.3 apresenta as coordenadas e as medidas realizadas a partir dos pontos 3D manualmente coletados nos cantos ao redor de cada “água” da superfície do telhado (FIGURA 4.4). Com base em coordenadas tridimensionais desses pontos calculam-se as dimensões das arestas da nuvem SfM que são comparadas com as medidas em campo (verdade de campo) (FIGURA 4.7). Estas operações visam validar os resultados, e se traduz na comparação, neste caso apenas na direção horizontal, de dimensões medidas em campo e as homólogas calculadas sobre a nuvem SfM.

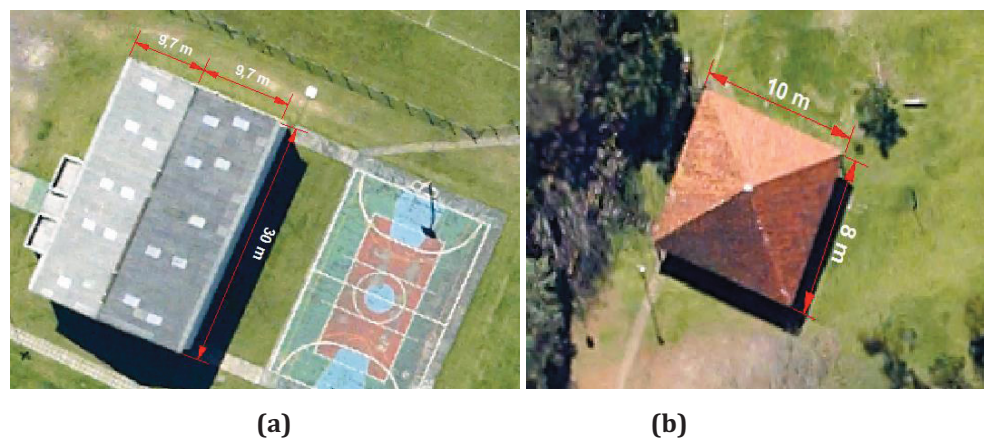


FIGURA 4.7: DIMENSÕES DE REFERÊNCIA DOS TELHADOS PARA OS EXPERIMENTOS (a) e (b).

TABELA 4.3: COORDENADAS DOS PONTOS LIDOS NA NUVEM 3D SfM.

	Ponto	Coordenadas na nuvem SfM			Arestas	Medidas realizadas		Diferenças	
		x (m)	y (m)	z (m)		Nuvem SfM (m)	Manual (m)	(m)	(%)
Exp. 1	1	8,87	11,44	2,50	Pontos1-2	9,57	9,7	0,13	1,34
	2	12,95	19,87	4,46	Pontos2-3	9,50	9,7	0,20	2,06
	3	17,01	11,60	2,14	Pontos3-4	29,61	30,0	0,39	1,30
	4	17,2	22,38	29,72	Pontos4-5	9,75	9,7	-0,05	-0,51
	5	20,5	24,93	20,90	Pontos5-6	9,54	9,7	0,16	1,65
	6	26,7	20,23	15,38	Pontos6-1				
Exp. 2	1	0,00	0,00	9,80	Pontos1-2	9,65	10,0	0,35	3,55
	2	0,00	9,15	6,75	Pontos2-3	7,91	8,0	0,08	1,09
	3	7,28	8,20	3,80	Pontos3-4	9,51	10,0	0,48	4,87
	4	6,20	0,00	8,50	Pontos4-1	7,86	8,0	0,14	1,75
	5	3,63	4,40	4,47	Pontos1-5	6,58			

Analisando a Tabela 4.3, constata-se que para o experimento 1, os melhores resultados foram obtidos com as medidas realizadas nas arestas entre os pontos 3-4 e 4-5 que tiveram diferenças em relação às medidas de referências iguais a 0,39 m e -0,05 m. Estas diferenças representam 1,30% e 0,51% destas distâncias respectivamente. Este resultado tem a ver com a distribuição uniforme de pontos nesta face. O pior resultado obteve-se com o cálculo da dimensão da aresta entre os pontos 2-3 com diferença de 0,20 m o que representa 2,06% da medida de referência. Isto é associado à falta de pontos na cumeeira do modelo em resultado das falhas na geração de pontos ao longo desta linha.

Para o experimento 2, as arestas entre os pontos 2-3 e 4-1 apresentaram melhores resultados, com diferenças em relação à medida de referência de 0,08 m e 0,14 m representado 1,09% e 1,75% da distância tomada em campo. Neste experimento, as arestas entre os pontos 1-2 e 3-4 apresentaram maiores erros, com diferenças de 0,35 m e 0,48 m, o que corresponde a 3,55% e 4,87% da medida de referência.

Em suma, os maiores erros obtidos nas medidas das dimensões das arestas, estão associados à ausência de pontos nas bordas inferiores e na cumeeira do modelo, o que embutiu erro no posicionamento tridimensional. Outra fonte de erro é a curvatura do modelo. As superfícies de telhados nos modelos encontram-se

bastante inclinadas em razão das distorções introduzidas pela lente, motivo pelo qual maiores diferenças de medidas podem ser esperadas.

4.5 CÁLCULO DE INCLINAÇÃO E ÁREA

Na FIGURA 4.8 são identificadas as faces dos telhados que são numerados de 1 a 2 e 1 a 4 para o primeiro e segundo experimentos. Salienta-se desde já que a finalidade última das grandezas extraídas (área, orientação, inclinação) é estimar o potencial fotovoltaico e hídrico.



FIGURA 4.8: IDENTIFICAÇÃO DAS FACES DOS TELHADOS PARA OS EXPERIMENTOS (a) e (b).

A partir das dimensões obtidas na Tabela 4.3 foi calculada a área, a inclinação (equação 3.13) e a orientação (equação 3.10) e mais uma vez, sua precisão comparada às dimensões tomadas em campo e da nuvem LiDAR (Tabela 4.4). No primeiro experimento, na nuvem SfM foi medida para as faces 1 e 2 áreas de 283,37 m² e 281,30 m² em comparação com 291 m² da verdade do campo. Isto equivale a uma diferença percentual de 2,62% e 3,33%, o que demonstra a precisão da nuvem SfM. No experimento dois, para as faces 1 e 3 obteve-se para a mesma medida 21,71 m² e 21,40 m² na nuvem SfM contra 21,38 m² medida em campo, resultando numa diferença percentual de 1,54% e 0,09% que mostra maior aproximação entre áreas dentro do modelo na nuvem SfM e a verdade do campo. Para as faces 2 e 4 obteve-se na nuvem SfM 20,96 m² e 20,82 m² comparável a 20,88 m² da verdade do campo, resultando numa diferença percentual de 0,38% e 0,003%. A segunda grandeza calculada foi a inclinação dos telhados. A partir da nuvem SfM, no primeiro experimento esta medida foi calculada como 55,06°, em contraste com 58,66° dentro do conjunto de dados LiDAR. A diferença percentual deste cálculo é de 6,13%. No segundo experimento o cálculo da orientação resultou em 53,42° e 56,72°, representando uma pequena diferença percentual de apenas 5.82%. Vale destacar

que o nível de precisão não é consistente dentro da nuvem SfM.

A orientação de cada telhado calculada dentro da nuvem SfM e tomadas como verdade de campo são $48,30^\circ$ contra 54° e $42,47^\circ$ contra 48° resultando diferenças percentuais de 10,56% e 11,52% para os experimentos 1 e 2 respectivamente.

TABELA 4.4: VALORES DE ÁREA, INCLINAÇÃO, ORIENTAÇÃO E SUAS DIFERENÇAS

		Parâmetros								
		Área (m ²)		Inclinação (°)		Orientação (°)		Diferenças		
	Telhado	Man.	SfM	LiDAR	SfM	LiDAR	SfM	Área (%)	Inc.(%)	Or.(%)
Exp1	Face 1	291	283,37	58,66	55,06	54	48,30	2,62	6,13	10,56
	Face 2	291	281,30	58,66	55,06	42	31,10	3,33	6,13	10,90
Exp2	Face 1	21,38	21,71	56,72	53,42	48	42,47	1,54	5,82	11,52
	Face 2	20,88	20,96	56,72	53,42	37	25,83	0,38	5,82	11,17
	Face 3	21,38	21,40	56,72	53,42	48	42,47	0,09	5,82	11,52
	Face 4	20,88	20,82	56,72	53,42	37	25,83	0,003	5,82	11,52

4.6 ESTIMATIVAS DO POTENCIAL SOLAR E HIDRICO

O resultado das áreas calculadas na Tabela 4.4, foi usado na equação (2.42), juntamente com dados de precipitação da região do estudo para estimar o total de precipitação que pode ser coletada a partir da cobertura do telhado (Tabela 4.5).

TABELA 4.5. ESTIMATIVA DA ÁGUA DA CHUVA QUE PODE SER COLETADA

	Telhado	Precipitação média (mm/ano)	Coef. da área	Total da água da chuva coletada (m ³ / ano)		Diferença	
				Manual	SfM	m ³ /ano	%
Exp1	Face 1	1571,28	0,8	365,80	356,20	9,6	2,62
	Face 2	1571,28	0,8	365,80	353,60	12,2	3,33
Exp2	Face 1	1571,28	0,8	26,87	27,30	0,43	1,58
	Face 2	1571,28	0,8	26,25	26,35	-0,1	0,38
	Face 3	1571,28	0,8	26,87	26,90	-0,03	0,11
	Face 4	1571,28	0,8	26,25	26,17	0,08	0,30

Pode ser observado que a água pluvial coletada no modelo da nuvem SfM é menor que a quantidade que seria coletada na dimensão em campo. No

experimento 1 esse valor varia entre 9,6 a 12,2 m³/ano enquanto que no experimento 2 varia entre 0,1 a 0,43 m³/ano. Esses valores representam até 3,33% da discrepância entre os modelos e os dados reais. Porém, conclui-se que a estimativa usando parâmetros extraídos da nuvem SfM é viável por apresentar resultados próximos à verdade do campo.

As áreas calculadas dentro da nuvem SfM foram utilizadas na equação (3.21), considerando: os valores da área e inclinação (TABELA 4.4); um painel com eficiência média (10,67%) e sem sombreamento ou nuvens. Tomando o valor do consumo brasileiro por habitante que é 2.000 kWh/ano. Quando os 2.000 kWh/ano são combinados para um agregado médio de três pessoas por residência, tem-se o percentual da demanda (TABELA 4.7).

TABELA 4.6. POTENCIAL DA ENERGIA PRODUZIDA

	Telhado	Potencial Voltaico (KWh/ano)		Diferença	
		Manual	SfM	Absoluta	%
Exp1	Face 1	43456,23	40891,1	2565,13	6,27
	Face 2	43456,23	40872,23	2584,00	6,32
Exp2	Face 1	3246,79	3105,17	141,62	4,56
	Face 2	3165,22	3216,79	-51,57	-1,60
	Face 3	3246,79	3287,33	-40,54	-1,23
	Face 4	3165,22	3136,17	29,05	0,93

Verifica-se que, entre os métodos, existem valores de área muito parecidos, como é o caso das faces do telhado da edificação do experimento 2. Por outro lado, valores muito diferentes também são encontrados, como é o caso das faces do experimento 1, que apresenta valores de diferenças ao entorno de 6%. Diante dos valores da tabela 4,3 em conjunto com a figura 4.2, é possível detectar algumas fontes de erro. Por exemplo, maiores erros podem ser esperados quando o modelo tem falta de pontos em algumas regiões, isto embute erro no cálculo da área da face do telhado. Outra fonte de erro é na determinação do inclinação. A distorção do modelo gerado conduz a erros na estimativa da inclinação do telhado.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste trabalho apresentamos um método rápido de modelagem 3D de telhados de edificações usando nuvem de pontos SfM criada a partir de uma série de aerofotografias UAV para extração de informação geométrica usada como *input* na estimativa do potencial fotovoltaico e coleta de água pluvial.

A pesquisa propõe uma metodologia para modelagem 3D de telhados de edifícios e extração de informação geométrica para a estimativa do potencial hídrico e fotovoltaico. A abordagem seguida considerou (1) tecnologias de baixo custo, que estão cada vez mais acessíveis no mercado e permitem novos métodos de geração de nuvens de pontos para modelagem 3D, além de desafios de segmentação e reconstrução; e (2) A captura e processamento rápido e flexível, que possibilitam processar e recuperar objetos 3D eficientemente. Como resultado, a solução apresentada reconstrói um modelo 3D e identifica os componentes que pertencem a um objeto físico capturado. A combinação de tecnologias de aquisição de baixo custo e softwares livres facilita a reprodução da metodologia. Além disso, a semi-automatização do procedimento permite a avaliação de cenas de pequena escala (por exemplo: edifícios e ou estruturas singulares), de forma rápida e precisa, sem a necessidade de consultar a documentação técnica de cada estrutura.

No tocante à aquisição de dados para o processamento com abordagem SfM, aplicada nesta metodologia, o voo realizado no modo assistido (manual) se mostrou compatível à aquisição de dados a partir de aerofotografias. Pese embora este modo de voo se mostrar altamente dependente do nível de habilidade e experiência do operador do UAV. A principal vantagem do modo de voo manual sobre os demais modos vem com a flexibilidade nesse tipo de voo e a resolução temporal que pode ser fixada ao critério do operador. O fluxo de trabalho no SfM pode ser facilmente automatizado conforme demonstrado neste estudo, usando software de código (semi) aberto ou disponível gratuitamente. O software usado neste estudo permite ao usuário pré-definir parâmetros de cálculo em *scripts* os quais podem ser executados facilmente em sequência. O único passo que requer a interação do usuário é a georreferenciação do modelo, mas, como foi observado anteriormente, isso é inteiramente opcional e pode ser facilmente automatizado se estiver usando softwares de voos. Este estudo também demonstrou como o pós-processamento de

dados SfM pode ser realizado usando as mesmas ferramentas usadas para dados LiDAR, neste caso MeshLab e Cloud Compare. Estas ferramentas podem ser facilmente automatizadas definindo parâmetros de processamento em *scripts*, porém exigem um certo nível de treinamento para que um os use

A nuvem de pontos SfM, pode ser usada para extração da informação geométrica para a estimação do potencial hídrico e fotovoltaico em telhados, com precisão percentual na ordem dos 3,5 a 6%. Este resultado não só valida a nossa metodologia como uma ferramenta útil para tomada de decisões na implantação de painéis solares para produção fotovoltaica e coleta de água de chuva em telhados, via modelagem 3D da nuvem de pontos SfM, mas também se mostra como um meio alternativo aos mecanismos convencionais de (aero) levantamento.

Os resultados obtidos demonstram a eficácia da adoção da metodologia proposta. Os resultados obtidos foram validados em campo. Entendemos que a metodologia apresentada pode ser considerada como referência para a intervenção em situações similares.

Embora se possa observar que os modelos 3D da nuvem de pontos SfM são bastante aproximados da estrutura real (do modelo LiDAR), a qualidade destes depende fortemente da triagem manual das fotos a serem usadas no processamento com VisualSfM e quiçá, da escolha do modelo final da nuvem de pontos 3D. Isso possibilita a preservação da informação geométrica da nuvem de pontos 3D durante todas as etapas de processamento, e com isso, a extração de medidas diretamente sobre as nuvens de pontos SfM dos planos modelados. Como resultado, o modelo 3D final pode ser então usado para extração de área, inclinação, e orientação do telhado.

No que se refere à eficácia da abordagem desenvolvida, a metodologia é aplicável ao tratamento de edificações isoladas (singulares). Mesmo admitindo que o processamento e modelagem 3D de vastas áreas poderia implicar múltiplos levantamentos e pós-processamentos, o tempo necessário para realizar a inspeção visual *in-situ* (suportada com documentação técnica) de grandes áreas por operadores humanos para alcançar um resultado similar não é viável. O mesmo se pode dizer quanto ao uso de imagens aéreas, LiDAR aerotransportado e topografia

convencional. Note-se que por um lado, um operador humano efetivaria uma decisão subjetiva na avaliação de áreas de telhado adequadas para instalação de painéis solares e coleta de água pluvial (sem geração de métricas precisas), por outro lado o uso de LiDAR aerotransportado ou topografia convencional nem sempre é acessível e normalmente demanda custos económicos e logística substancial que limitam esta aplicação. Por estas razões, a abordagem proposta é um importante avanço, uma vez que apenas um operador com UAV é necessário para realizar todo o processo.

A principal desvantagem da metodologia proposta é a possibilidade de encontrar superfícies homogêneas sobre os telhados, onde a geração de nuvens de pontos com abordagem SfM falha. Estas falhas conduzem ao aparecimento de áreas vazias, sem pontos ou com muito ruído que dificultam o processo de modelagem, e com isso, embutir erros na extração da geometria do modelo.

Diferentes aplicações terão exigências diferentes. A presente metodologia foi testada para modelagem 3D e cálculo de geometria de telhados. Porém, é necessário notar que diferentes objetos apresentariam desempenho diferente na geração da nuvem de pontos SfM e reconstrução 3D. Em aplicações específicas, será necessário entrar em mais detalhes sobre objetos de interesse, encontrar GSDs apropriados, planejamento de voo e outros parâmetros e indicadores de qualidade para missões de UAV.

Dentre várias dificuldades encaradas importa referenciar a instabilidade do UAV. Variações atmosféricas (vento superior a 15 km/h) afastaram a verticalidade da câmera no instante da tomada das imagens provocando variações no ângulo de visadas a nadir no instante da tomada de aeroimagens, como também a manutenção da posição do UAV nas linhas de voo;

Como recomendação para trabalhos futuros, sugere-se a inclusão na metodologia o passo referente à calibração da lente para remover as distorções introduzidas pela lente da câmera e com isso minimizar o potencial de ruído na nuvem de pontos SfM e o nível de precisão (fator de escala) dentro da nuvem.

Automatizar o processo de filtragem e de determinação do limiar de diferença angular na modelagem.

Outro fator a ser explorado se refere em testar esta metodologia para avaliação da textura de telhados, inspeção de estruturas, avaliação/reconhecimento pós-catástrofe.

REFERÊNCIAS

- ABER, J.S.; MARZOLFF, I.; RIES, J. **Small-Format Aerial Photography: Principles, techniques and geoscience applications**. Elsevier, Amsterdam, Netherlands, 2010.
- AGARWAL, S.; SNAVELY, N.; SEITZ, S.M.; SZELISKI, R. **Multicore Bundle Adjustment**, University of Washington, USA.
- AGUGIARO, G.; NEX, F.; REMONDINO, F.; DE FILIPPI, R.; DROGHETTI, S.; FURLANELLO, C. **Solar radiation estimation on building roofs and web-based solar cadastre**. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, I-2, 177-182. XXII ISPRS Congress. 2012.
- AUMONT, J.; MARIE, M. **Dicionário teórico e crítico de cinema**, Tradução de Eloísa Araújo Ribeiro. Campinas-SP. Editora Papirus, 2003.
- BAE, K., LICHTI, D. D. **A method for automated registration of unorganized point clouds**. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 63(1), 36-54, 2008.
- BONESSO, S.; MUTANI, G.; HUBINA, T.; RAMASSOTTO, A. **L'applicazione delle tecnologie fotovoltaiche integrate sulle coperture degli edifici con software GIS: GEOmedia**, n. 2/2013, 6-11. 2013. Disponível em: <http://mediageo.it/ojs/index.php/GEOmedia/article/viewFile/268/241>.
- BORFECCHIA, F.; POLLINO, M.; DE CECCO, L., MARTINI, S., LA PORTA, L., MARUCCI, A., CAIAFFA, E. **Integrated GIS and Remote Sensing Techniques to Support PV Potential Assessment of Roofs in Urban Areas**. *Computational Science and Its Applications–ICCSA*, 2013.
- BOULOS, P. C. I. **Geometria Analítica**. 3a ed. revisada e ampliada - São Paulo: Prentice Hall, 2005.
- BRILAKIS, I.; FATHI, H.; RASHIDI, A. **Progressive 3D reconstruction of infrastructure with videogrammetry**. *Automation in Construction*, 884–895, 2011.
- BROWN, M.; LOWE, D.G. **Invariant features from interest point groups**. In *British Machine Vision Conference*, Cardiff, Wales, 2002. pp. 656–665.
- BENDIG, J, V. **Unmanned aerial vehicles (UAVs) for multi-temporal crop surface modeling**. A new method for plant height and biomass estimation based on RGB-imaging. Inaugural - Dissertation. Germany, 2014.
- BENDIG, J., BARETH, G. **UAV-based Remote Sensing Methods for Monitoring Vegetation**, Presented at the Workshop on Cologne, Germany, 2014. pp.1-2.

- BLYENBURGH VAN, P. **RPAS Yearbook: Remotely Piloted Aircraft Systems: The Global Perspective 2013/2014**. Technical Report. UVS International. Paris, France, 2013.
- COLOMINA, I.; MOLINA, P. **Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review**. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 92, 79–97.doi:10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013, 2014.
- COLLE, S.; PEREIRA, E. B. **Atlas de irradiação solar do Brasil**. Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e Laboratório de Energia Solar (LABSOLAR)-EMC/UFSC. Brasília, 1998.
- CONWAY, D.; LIM, S. **Using LiDAR to estimate the capacity for storm water recycling and solar energy collection**. In Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), IEEE International, 2010. pp. 4545-4548.
- COHEN, A.; ZACH, C.; SINHA, S. N.; POLLEFEYS, M. **Discovering and exploiting 3D symmetries in structure from motion**. Proceedings of the 2012 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), IEEE Computer Society: 1514-1521, 2012.
- CHEN, Y.; MEDIONI, G. **Object Modelling by Registration of Multiple Range Images**. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation Image, 1991, Sacramento CA. p. 2724-2729. Vision Comput., v. 10, p. 145-155, 1992. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=132043>>. Acesso em 15 de Abril de 2016.
- CHIABRANDO, F.; DANNA, C.; LINGUA, A.; NOARDO, F.; OSELLO, A. **Effective tools for supporting energetic policies: 3d urban models generation and analysis**. Geomatics Workbooks n° 12 - "FOSS4G Europe Como 2015".
- CRANDALL D.; OWENS A.; SNAVELY N.; HUTTENLOCHER D. P. **Discrete-continuous optimization for large-scale structure from motion**. In CVPR, 2011.
- DAI, F.; FENG, Y.; HOUGH, R. **Photogrammetric error sources and impacts on modeling and surveying in construction engineering applications**. Visualization in Engineering 2014. Disponível em: <http://www.viejournal.com/content/2/1/2>
- DAI, F.; LU, M. **Three-dimensional modeling of site elements by analytically processing image data contained in site photos**. Journal of Construction Engineering and Management, 139(7), 881–894. Reston, VA: ASCE, 2013.

- DEWULF, J.; LANGENHOVE, H. V. **Renewables-based technology, sustainability assessment**. Research Group ENVOC, Ghent University, Belgium, 2006.
- EVERAERTS, J. **The use of Unmanned Aerial Vehicles (UAVS) for remote sensing and mapping**. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVII (B1), 1187–1192, 2008.
- EISENBEISS, H. **UAV Photogrammetry**. PhD Dissertation, Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH Zurich, Switzerland, Mitteilungen N.105, 2009. 235 p.
- EISENBEISS, H. **The Potential of Unmanned Aerial Vehicles for Mapping**, in: Fritsch/Spiller (eds.): Photogrammetric Week 2011, Wichmann Verlag, Heidelberg, 2011, pp. 135-145.
- ENRICO, C. The Sun the Celestial Vault. Chap.2 in A.A.M. Sayigh (ed.), **Solar Energy Engineering**, Academic Press. New York, 1977.
- ENSEN, J. L. R.; Mathews, A. J. **Assessment of Image-Based Point Cloud Products to Generate a Bare Earth Surface and Estimate Canopy Heights in a Woodland Ecosystem**. Remote Sens.; doi: 10.3390/rs8010050. Disponível em: www.mdpi.com/journal/remotesensing. 2016.
- FILHO, P.; PÁDUA, DE W. **Multimídia: Conceitos e Aplicações**. 2a edição. Editora LTC. Rio de Janeiro, 2011.
- FLETCHER, T.D.; DELETIC, A.; MITCHELL, V.G.; HATT, B.E. **Reuse of urban runoff in Australia: a review of recent advances and remaining challenges**. Journal of Environmental Quality 37, S116eS127, 2008.
- FONSTAD, M.A.; DIETRICH, J.T.; COURVILLE, B.C.; JENSEN, J.L.; CARBONNEAU, P.E. **Topographic Structure from Motion: A New Development in Photogrammetric Measurement**. Earth Surf. Process. Land., 38, 421–430, 2013.
- FOSTER, R.; MAJID G.; ALMA C. **Solar energy: renewable energy and the environment**. CRC Press, 2009.
- FURUKAWA, Y.; J. PONCE. **Accurate, dense, and robust multi-view stereopsis**. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 32(8), 1362–1376. 108,124, 2010.
- FURUKAWA, Y.; PONCE, J. **Accurate, Dense, and Robust Multiview Stereopsis**. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2009.
- FURUKAWA, Y.; PONCE, J. **Accurate, Dense, and Robust Multi-View Stereopsis**,

- IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 32, no. 8, 2007. pp. 1362-1376.
- FRAHM J., M.; GEORGEL P.; GALLUP D.; JOHNSON T.; RAGURAM R.; WU C.; JEN Y. H.; DUNN E.; CLIPP B.; LAZEBNIK S.; POLLEFEYS M.: **Building Rome on a Cloudless Day**. In ECCV, 2010.
- FUNK, E.; DOOLEY, L. S.; BOERNER, A.; GRIESSBACH, D. **Implicit Scene Modeling from Imprecise Point Clouds**. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-4/W4, Cape Town, South Africa, 2013.
- FURUKAWA Y.; PONCE J. **Accurate, dense, and robust multiview stereopsis**. IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell, 32, 2010.pp.1362-1376.
- GEMAEL, C.: **Introdução ao ajustamento de Observações**: Aplicações Geodésicas. Curitiba. Editora UFPR. 1994. 319p.
- HAALA, N.; KADA, M. **An update on automatic 3D building reconstruction**. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 65, 2011. pp. 570-580.
- HAALA, N.; ROTHERMEL, M. **Dense multi-stereo matching for high quality digital elevation models**. PFG, vol. no. 4, 2012. pp. 331–343.
- HARTLEY R. I.; ZISSERMAN A. **Multiple View Geometry in Computer Vision**, 2nd ed. Cambridge Univ. Press, 2004.
- HARTLEY, R.; ZISSERMAN, A. **Multiple View Geometry in computer vision**. Cambridge University Press, Second Edition, 2003.
- HARTLEY, R. **In defense of the eight-point algorithm**, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 19, no. 6, 1997.pp. 580-593.
- HIRSCHMULLER, H. **Stereo processing by semi-global matching and mutual information**: IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 30, no. 2, 2008. pp. 328–341.
- HUANG, T.; FAUGERAS, O. **Some properties of the E-matrix in two-view motion estimation**, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 11, no. 12, 1989. pp. 1310-1312.
- HUJEBRI, B.; SAMADZADEGAN, F.; AREFI, H. **Fusion of ALS Point Cloud and Optical Imagery for 3D Reconstruction of Building's Roof**. International Archives

of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-1/W3, Tehran, Iran, 2013.

HUMMEL, S.; HUDAK, A.T.; UEHLER, E.H.; FALKOWSKI, M.J.; MEGOWN, K.A. **A Comparison of Accuracy and Cost of LiDAR versus Stand Exam Data for Landscape Management on the Malheur National Forest.** J. For. 109, 267–273, 2011.

IST; DGS; UE. **Energia fotovoltaica, manual sobre tecnologias, projeto e instalação.** 2004, Janeiro. Disponível em:

<http://www.greenpro.de/po/fotovoltaico.pdf>: Acesso em 14 de Abril de 2016.

INMET. **Instituto Nacional de Meteorologia - Observações.** Disponível em: <http://www.inmet.gov.br>: Acesso em 4 de Abril de 2016.

IPPUC – **Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Curitiba.** Disponível em: www.ippuc.org.br. Acesso em 7 de Maio de 2016.

ISPRS. Tips for the effective use of close range digital photogrammetry for the Earth sciences, ISPRS - Commission V - Close-Range Sensing: Analysis and Applications Working Group V / 6 DIGARCH 2015 20 - Close range morphological measurement for the earth sciences, 2008-2012, disponível em: <http://isprsv6.lboro.ac.uk/tips.html>

JOHEM, A.; HOFLE, B.; RUTZINGER, M.; PFEIFER, N. **Automatic Roof Plane Detection and Analysis in Airborne LiDAR Point Clouds for Solar Potential Assessment.** Sensors 2009.

JORGE, C.; INAMASU, Y.; CARMO, B. **Desenvolvimento de um VANT totalmente configurado para aplicações em Agricultura de Precisão no Brasil,** Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, INPE, Curitiba, PR, 2011

KOCH R. **3D-Scene modeling from image sequences,** ISPRS Archives, Vol. XXXIV, Part 3/W8, p17-19, Munich, 2003.

KOSECKA, J.; ZHANG, W. **Extraction, matching, and pose recovery based on dominant rectangular structures.** Computer Vision and Image Understanding 100: 274–293, 2010.

KUNG, O.; STRECHA, C.; FUA, P.; GURDAN, D.; ACHELNIK, M.; DOTH, K.; STUMPF, J. **Simplified Building Models Extraction From Ultra-light UAV Imagery.** International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVIII-1/C22. Zurich, Switzerland, 2011.

- KHAN, A.; SCHAEFER, D.; TAO, L.; MILLER, D.; SUN, K.; ZONDLO, M.; HARRISON, W.; ROSCOE, B.; LARY, D. **Low Power Greenhouse Gas Sensors for Unmanned Aerial Vehicles**. *Remote Sensing*, 4, 1355-1368, 2012.
- LAB-VOLT Ltd., **Renewable Energy Solar Power Courseware Sample by the Staff of the Lab-Volt Solar Power Technology Training System**, First Edition, 2009.
- LAFARGE, F.; ALLIEZ, P. **Surface reconstruction through point set structuring**. *Computer Graphics Forum*, Wiley Online Library, 225-234. 2013.
- LALIBERTE, A.S.; GOFORTH, M.A.; STEELE, C.M.; RANGO, A. **Multispectral Remote Sensing from Unmanned Aircraft: Image Processing Workflows and Applications for Rangeland Environments**. *Remote Sensing*, 2011.
- LONGHITANO, G. A. **VANTS para sensoriamento remoto: aplicabilidade na avaliação e monitoramento de impactos ambientais causados por acidentes com cargas perigosas**. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica. Universidade de São Paulo, 2010. 148p.
- LOURAKIS, M.I.A.; ARGYROS, A.A. **The Design and Implementation of a Generic Sparse Bundle Adjustment Software Package Based on the Levenberg-Marquardt Algorithm**, ICS/FORTH Technical Report No. 340, 2004.
- LOWE, D.G. **Object Recognition from Local Scale-invariant Features**. *International Conference on Computer Vision*, Corfu, Greece, 1999. pp. 1150-1157.
- LOWE, D. **Distinctive image features from scale-invariant keypoints**. *International Journal of Computer Vision* 60, 91–110. 2004.
- LÓPEZ-FERNÁNDEZ, L.; LAGÜELA, S.; PICÓN, I.; GONZÁLEZ-AGUILERA, D. **Large-scale automatic analysis and classification of roof surfaces for the installation of solar panels using a multi-sensor aerial platform**. *Remote Sens.* 2015
- LUONG, Q. T.; FAUGERAS, O. **The fundamental matrix: theory, algorithms, and stability analysis**, *International Journal of Comp. Vis*, vol. 17, no. 1, 1996. pp. 43-76.
- LONGUET-HIGGINS, H. C. **A computer algorithm for reconstructing a scene from two projections**. *Nature*, v. 293, 1981. pp.133–135.
- LUHMANN, T.; ROBSON, S.; KYLE, S., HARLEY, I. **Close range photogrammetry: principles, methods and applications**. Scotland, UK: Whittles Publishing, 2006.
- MANCINI, F.; DUBBINI, M.; GATTELLI, M.; STECCHI, F.; FABBRI, S.; GABBIANELLI, G. **Using Unmanned Aerial Vehicles (UAV) for High-Resolution Reconstruction**

- of Topography: The Structure from Motion Approach on Coastal Environments.** Remote Sens.,5, 6880–6898, 2013.
- McCUEN, R. **Hydrologic Analysis and Design**, third ed. Pearson Education Inc, Upper Saddle River, NJ, 2004.
- McGLONE, J. C.; MIKHAIL, E. M.; BETHEL, J. **Manual of Photogrammetry**. Bethesda, Maryland, United States of America, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2004.
- MENDES, C. C. T. **Navegação de Robôs Móveis Utilizando Visão Estéreo**. Biblioteca Digital da USP. Campinas, 2012.
- MICHELETTI, N.; CHANDLER, JH; LANE SN. **Investigating the geomorphological potential of freely available and accessible structure-from-motion photogrammetry using a smartphone.** Earth Surface Processes and Landforms, DOI: 10.1002/esp.3648. 2014.
- NEX, F.; REMONDINO, F.; AGUGIARO, G.; DE FILIPPI, R.; POLETTI, M.; FURLANELLO, C.; MENEGON, S.; DALLAGO, G.; FONTANARI, S. **3D Solar Web: a solar cadaster in the Italian alpine landscape.** International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-7/W2, 2013.
- NIETHAMMER, U.; JAMES, M.R.; ROTHMUND, S.; TRAVELLETTI, J.; JOSWIG, M. **UAV-Based Remote Sensing of the Super-Sauze Landslide: Evaluation and Results,** Engineering Geology, vol. 128, no. 1, 2012. pp. 2-11.
- QUAN, L. **Image-Based Modeling,** Springer Science Business Media. Engineering Optimization: Theory and Practice. Canada, John Wiley & Sons, Inc., 2010.
- RAMON F.; TITO M.; ALBERT G.; CARLOTA, T; JOAN R.; XAVIER G. **Roof selection for rainwater harvesting: Quantity and quality assessments in Spain.** Water research 45 3245 e 3254, 2011.
- REMONDINO, F.; SPERA, M.G.; NOCERINO, E.; MENNA, F.; NEX, F. **State of the art in high density image matching.** Photogram Rec 29, 2014.
- ROSNELL, T.; HONKAVAARA, E. **Point cloud generation from aerial image data acquired by a quadrocopter type micro unmanned aerial vehicle and a digital still camera.** Sensors, 12, 453–480, 2012

- RUTHER, R. Edifícios Solares Fotovoltaicos: **O Potencial da Geração Solar Fotovoltaica Integrada a Edificações Urbanas e Interligada à Rede Elétrica Pública no Brasil**. Florianópolis, 2004.
- SCAIONI, M. (2005). **Direct georeferencing of TLS in surveying of complex sites**. Italia. Disponível em: <<http://www.commission5.isprs.org/3darch05/pdf/23.pdf>>. Acesso em 5 de Maio de 2016.
- SCHARSTEIN, D.; SZELISKI, R. **A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms**. International Journal of Computer Vision 47, 7–42. doi:10.1023/A:1014573219977, 2002.
- SHAMOS, M.I.; HOEY, D. **Closest-point problems**. In: IEEE Symposium on the Foundations of Computer Sciences, 16. 1975, Berkeley, California, Estados Unidos. Proceedings...[S.l.:s.n],.p.151-162. 1975.
- SIMON, D. A. **Fast and Accurate Shape-Based Registration**, Ph. D. Dissertation, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, Pennsylvania, 1996.
- SINGH, V.P. **Elementary Hydrology**. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 1992.
- SONA, G.; PINTO, L.; PAGLIARI, D.; PASSONI, D.; GINI, R. **Experimental analysis of different software packages for orientation and digital surface modelling from UAV images**. Earth Science Informatics, 2014.
- SURI, M.; HOFIERKA, J. **A new gis-based solar radiation model and its application to photovoltaic assessments**. Trans. GIS, 8, 175-190, 2004.
- STIVANELLO, M. E. **Desenvolvimento de uma biblioteca para sistemas de visão estereoscópica para robótica móvel**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina. Dissertação, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2008.
- SNAVELY, N.; SEITZ, S.; SZELISKI, R. **Modeling the World from Internet Photo Collections**. IJCV 80, 2, 2008.
- SNAVELY, N.; SEITZ, S.; SZELISKI, R. Photo Tourism: **Exploring Photo Collections in 3D**. In SIGGRAPH, 2006.
- SZELISKI, R. **Building Rome in a day**. Communications of the ACM 54, 2011.
- SZELISKI, R. Computer Vision: **Algorithms and Applications**. London, Springer, 2010
- TAKIMOTO, R. Y.; NEVES, A. C.; MARTINS, T. C.; TAKASE, F. K; TSUZUKI, M. S. G. **Automatic epipolar geometry recovery using two images**, Proceedings of the

- 18th IFAC World Congress, Milan, Italy, 2011. pp. 3980-3985.
- TOA, T.; NGUYEN, D.; TRAN, G. **Automated 3d Architecture Reconstruction From Photogrammetric Structure And Motion: A Case Study Of The “One Pilla” Pagoda, Hanoi, Vietnam.** The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-7/W3, Berlin, Germany, 2015.
- TORSTEN, S. **Efficient & Effective Image-Based Localization.** Dissertation. RWTH Aachen University, Germany, 2013.
- TURNER, D.; LUCIEER, A.; WATSON, C. **An automated technique for generating georectified mosaics from ultra-high resolution unmanned aerial vehicle (UAV) imagery, based on structure from motion (SfM) point clouds.** Remote Sensing, 4, 1392–1410, 2012.
- TRUCCO, E.; VERRI, A. **Introductory Techniques for 3D Computer Vision.** Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1998.
- TRIGGS, B.; MCLAUCHLAN, P.; HARTLEY R.; FITZGIBBON, A. **Bundle adjustment - a modern synthesis.** Int'l Wksp. on Vision Algorithms: Theory and Practice, 2000.
- ULLMAN, S. **The interpretation of visual motion.** MIT Press, Cambridge, USA, 1979.
- VU, H. H. R.; KERIVEN, P.; LABATUT, J.; PONS, P. **Towards high-resolution large-scale multi-view stereo,** in Computer Vision and Pattern Recognition. CVPR 2009. IEEE Conference on. IEEE, 2009, pp. 1430–1437.
- VAN BLYENBURGH, P. **UAVs: an overview.** Air & Space Europe 1, 1999.
- VAN ROON, M. **Water localization and reclamation: steps towards low impact urban design and development.** Journal of Environmental Management 83, 437 e 447. TIRPAK, John-The RPA Boom, 2007. pp. 36-42.
- VETRIVEL, A.; GERKE, M.; KERLE, N.; VOSSSELMAN, G. **Segmentation of UAV-based images incorporating 3D point cloud information.** The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-3/W2, Munich, Germany. 2015.
- VISSMAN, W.; LEWIS, G.L. **Introduction to Hydrology,** fifthth ed. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 2003.
- VILLALVA, M; GAZOLI, J. **Energia solar fotovoltaica: Conceitos e aplicações.** 1ª Edição. São Paulo: Érica, 2012. 224p.
- WATTS, A.C.; AMBROSIA, V.G.; HINKLEY, E.A. **Unmanned Aircraft Systems in**

- Remote Sensing and Scientific Research: Classification and Considerations of Use.** *Remote Sens.*,4, 1671–1692, 2012.
- WESTOBY, M.J.; BRASINGTON, J.; GLASSER, N.F.; HAMBREY, M.J.; REYNOLDS, J.M. **“Structure-from-Motion” Photogrammetry: A Low-Cost, Effective Tool for Geoscience Applications.** *Geomorphology*, 179, 300–314, 2012.
- WILSON, K.; SNAVELY, N. **Network Principles for SfM: Disambiguating Repeated Structures with Local Context.** *Computer Vision (ICCV)*, IEEE International Conference on, 2013.
- WU, C.; AGARWAL, S.; CURLESS, B.; SEITZ, S.M. **Multicore Bundle Adjustment,** University of Washington, USA.
- WU, C.; **Towards linear-time incremental structure from motion.** In *3DTV-Conference, International Conference on*, IEEE, 2013. pp. 127–134.
- WU, C. **VisualSfM: A Visual Structure from Motion System.** Disponível em <<http://homes.cs.washington.edu/~ccwu/vsfm/>>. 2011. Acesso em 7 de Ag. 2015.
- XIONG, B.; ELBERINK, O.; VOSELMAN, G. **Building Modeling From Noisy Photogrammetric Point Clouds.** *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume II-3, Zürich, Switzerland, 2014.
- ZISCHINSKY, T.; DORFNER, L.; ROTTENSTEINER, F. **Application of a new Model Helicopter System in Architectural Photogrammetry.** Amsterdam: IAPRS, Part B5/2. v. XXXIII, 2000.
- ZHANG, Z.; LOOP, C. **Estimating the fundamental matrix by transforming image points in projective space.** *Computer Vis Image Underst.* 82(2): 174–180, 2001.
- ZHU, K.; ZHANG, L.; HART, W.; LIU, M.; CHEN, H. **Quality issues in harvested rainwater in arid and semi-arid Loess Plateau of northern China.** *Journal of Arid Environments* 57, 487 e 505, 2004.