

UNIVERSIDADE FEDERAL DA FRONTEIRA SUL
CAMPUS CERRO LARGO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AMBIENTE E TECNOLOGIAS
SUSTENTÁVEIS - PPGATS

MARLON HENRIQUE HETZEL MATOS

MAPEAMENTO DE COBERTURAS E ESTIMATIVA DE IRRADIAÇÃO SOLAR

CERRO LARGO

2022

MARLON HENRIQUE HETZEL MATOS

MAPEAMENTO DE COBERTURAS E ESTIMATIVA DE IRRADIAÇÃO SOLAR

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ambiente e Tecnologias Sustentáveis da Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), como requisito para obtenção do título de Mestre em Ambiente e Tecnologias Sustentáveis.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luis Palacios Felix

CERRO LARGO

2022

Bibliotecas da Universidade Federal da Fronteira Sul - UFFS

Matos, Marlon Henrique Hetzel
Mapeamento de coberturas e estimativa de irradiação solar / Marlon Henrique Hetzel Matos. -- 2022.
106 f.

Orientador: Dr. Jorge Luis Palacios Felix

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal da Fronteira Sul, Programa de Pós-Graduação em Ambiente e Tecnologias Sustentáveis, Cerro Largo, RS, 2022.

1. RPA, mapeamento, coberturas, irradiação solar. I. Felix, Jorge Luis Palacios, orient. II. Universidade Federal da Fronteira Sul. III. Título.

MARLON HENRIQUE HETZEL MATOS

MAPEAMENTO DE COBERTURAS E ESTIMATIVA DE IRRADIAÇÃO SOLAR

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ambiente e Tecnologias Sustentáveis da Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS) como requisito para obtenção do grau de Mestre em Ambiente e Tecnologias Sustentáveis.

Este trabalho foi defendido e aprovado pela banca em 01/09/2022.

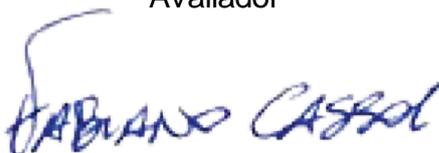
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Jorge Luis Palacios Felix – UFFS
Orientador



Prof. Dr. Mario Sergio Wolski – UFFS
Avaliador



Prof. Dr. Fabiano Cassol – UFFS
Avaliador

Dedico este trabalho a minha família, que
não poupou esforços para que eu
pudesse concluir meus estudos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família por sempre estar ao meu lado durante esses anos de estudo, em especial a minha mãe Marta que nunca deixou de acreditar em mim e meu tio Luis que viabilizou a realização do projeto.

Ao meu professor orientador Prof. Dr Jorge Luis Palacios Felix pela paciência e confiança depositadas.

A Universidade Federal da Fronteira Sul - UFFS pela oportunidade de desenvolver esse projeto, juntamente com todos os docentes envolvidos na formação.

Todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações. (Art. 225 da Constituição Federal, 1988)

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo avaliar uma metodologia de mapeamento e estimativa de irradiação solar sobre coberturas de seis edificações da Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS) – Campus Cerro Largo. As coberturas foram agrupadas em três áreas amostrais e os dados coletados, com o auxílio de um RPA (Aeronave Remotamente Pilotada), geraram um Modelo Digital de Superfície (MDS). A declividade média da área um foi de 14.75° , enquanto das áreas dois e três ficaram em 9.83° e 7.55° , respectivamente. As coberturas inclinadas para as regiões norte e sul ocupam uma maior área nas coberturas, com 30% cada, as demais orientações variam entre 5% e 8%. A partir do MDS foi estimada a irradiação solar total, através da ferramenta *r.sun*, desenvolvida pela GrassGis, para dois dias do ano (solstício de inverno e verão no hemisfério sul). Para a cobertura da área um, no solstício de inverno a estimativa de irradiação variou entre 336 e 6.958 Wh/m².dia (média = 3.395 Wh/m².dia). Já para o verão, a variação ficou entre 575 e 9.466 Wh/m².dia, com média de 8.607 Wh/m².dia. Os dados de irradiação solar para a cobertura da área dois, obtiveram variação entre 337 e 6.616 Wh/m².dia no solstício de inverno e 577 e 9.464 Wh/m².dia no solstício de verão, com médias de 3.617 e 8.884 Wh/m².dia, respectivamente. Para a área três, por outro lado, os valores variaram entre 338 e 6.956 Wh/m².dia no solstício de inverno e 578 e 9.465 Wh/m².dia no solstício de verão, suas médias ficaram em 3.595 e 9.108 Wh/m².dia, respectivamente. A irradiação total estimada para o solstício de inverno nas áreas um, dois e três foi de 5.639, 4.467 e 13.427 KWh.dia, respectivamente. Já para o solstício de verão foram verificados valores de 14.296, 10.972 e 34.018 KWh.dia. Os resultados obtidos foram comparados com dados da rede de estações meteorológicas do INMET e da estação meteorológica automática IRIOGRAN38 localizada no *campus* da universidade. Observou-se uma diferença dos valores estimados no solstício de inverno entre 38% e 47% para os dados médios da estação meteorológica A810 e 63%, 73% na estação 83907 e entre 44% e 53% na estação IRIGRAN38. Para o solstício de verão as diferenças ficaram entre 48% e 57% na estação A810, 31% e 39% na estação 83907 e 48% e 56% na estação IRIGRAN38. A estimativa de irradiação solar realizada através da ferramenta *r.sun* presente no software QGIS se mostrou eficiente para modelagem de irradiação solar em dias de céu claro, caso a

intenção do projeto seja planejar a instalação de painéis solares, deve-se adicionar ao modelo um índice que considere a nebulosidade da região.

Palavras-chave: RPA, mapeamento, coberturas, irradiação solar

ABSTRACT

This study aimed to evaluate a methodology for mapping and estimating solar radiation on the roofs of six buildings at the Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS) – Campus Cerro Largo. The coverages were grouped into three sample areas and the data collected, with the aid of an RPA (Remotely Piloted Aircraft), generated a Digital Surface Model (MDS). The average slope of area one was 14.75° , while areas two and three were 9.83° and 7.55° , respectively. The sloping roofs towards the north and south occupy a larger area in the roofs, with 30% each, the other orientations vary between 5% and 8%. From the MDS, the total solar irradiance was estimated, using the r.sun tool, developed by GrassGis, for two days of the year (winter and summer solstice in the southern hemisphere). For the coverage of area one, in the winter solstice the irradiation estimate varied between 336 and 6,958 Wh/m².day (average = 3,395 Wh/m².day). For the summer, the variation was between 575 and 9,466 Wh/m².day, with an average of 8,607 Wh/m².day. The solar irradiation data for the coverage of area two, obtained variation between 337 and 6,616 Wh/m².day in the winter solstice and 577 and 9,464 Wh/m².day in the summer solstice, with averages of 3,617 and 8,884 Wh/m².day, respectively. For area three, on the other hand, the values varied between 338 and 6,956 Wh/m².day in the winter solstice and 578 and 9,465 Wh/m².day in the summer solstice, their averages were 3,595 and 9,108 Wh/m².day, respectively. The estimated total irradiation for the winter solstice in areas one, two and three was 5,639, 4,467 and 13,427 kWh.day, respectively. For the summer solstice, values of 14,296, 10,972 and 34,018 kWh.day were verified. The results obtained were compared with data from the INMET meteorological station network and the IRIOGRAN38 automatic meteorological station located on the university campus. There was a difference in the estimated values at the winter solstice between 38% and 47% for the mean data from the A810 meteorological station and 63%, 73% at the 83907 station and between 44% and 53% at the IRIGRAN38 station. For the summer solstice the differences were between 48% and 57% at station A810, 31% and 39% at station 83907 and 48% and 56% at station IRIGRAN38. The estimation of solar irradiation carried out through the r.sun tool present in the QGIS software proved to be efficient for modeling solar irradiation on clear sky days, if the intention of the project

is to plan the installation of solar panels, one must add to the model a index that considers the cloudiness of the region.

Keywords: RPA, mapping, rooftop, solar irradiation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Etapas e opções envolvidas na avaliação do potencial solar em um determinado local.	20
Figura 2 - Análise da radiação solar no mês de junho, na área de estudo em Turin, Itália.	21
Figura 3 - Eletricidade produzida por painéis fotovoltaicos em telhados residenciais.	22
Figura 4 - Uma comparação de estimativas de radiação solar para duas subdivisões residenciais diferentes.	24
Figura 5 - Demonstração da diferença nos valores de radiação solar entre telhados residenciais e comerciais.	24
Figura 6 - Valores de irradiância solar dos telhados da área de estudo.	25
Figura 7 - Matriz elétrica mundial.	26
Figura 8 - Matriz elétrica brasileira.	26
Figura 9 - Micro e Minigeração distribuída em 2021.	27
Figura 10 - Componentes da radiação solar.	28
Figura 11 - Órbita da Terra em torno do Sol, com seu eixo inclinado em um ângulo de 23,45°, indicando as estações do ano no hemisfério Sul.	29
Figura 12 - Média diária de irradiância solar global no Brasil.	30
Figura 13 - Câmara aérea instalada na aeronave.	31
Figura 14 - Sequência de modelos estereoscópicos utilizados em aerofotogrametria.	32
Figura 15 - Esquema de plano de voo com superposição de faixas de fotos.	32
Figura 16 - Representação do mundo real, em modelos de dados vectoriais e raster.	35
Figura 17 - Mapa de Localização da Universidade Federal da Fronteira Sul - Campus Cerro Largo.	37
Figura 18 - DJI Mavic 2 Pro.	38
Figura 19 - Fluxograma de etapas da metodologia.	39
Figura 20 - Áreas de interesse.	40
Figura 21 - Capturas de tela do plano de voo para a área três.	41
Figura 22 - Aplicativo UAV Forecast.	42

Figura 23 - Software Pix4d.....	43
Figura 24 - Caminho para geração do aspecto no software QGIS.....	44
Figura 25 - Geração da camada de aspecto.....	45
Figura 26 - Caminho para geração da declividade no software QGIS	45
Figura 27 - Geração da camada de declividade.....	46
Figura 28 - Ferramenta r.sun	47
Figura 29 – Geração da camada de Irradiação	48
Figura 30 - Nuvens esparsas de pontos geradas no software Pix4d (a) área um (b) área dois (c) área três.....	50
Figura 31 - Nuvens densas de pontos geradas no software Pix4d (a) área um (b) área dois (c) área três.....	52
Figura 32 – Exemplo de remoção de outliers da nuvem densa de pontos	53
Figura 33 - Malhas de triangulos irregulares geradas no software Pix4d (a) área um (b) área dois (c) área três.....	54
Figura 34 - Erros de projeção na malha de triângulos irregulares.....	55
Figura 35 - Ortomosaicos gerados no software Pix4d (a) área um (b) área dois (c) área três.....	56
Figura 36 - Modelos Digitais de Superfície gerados no software Pix4d (a) área um (b) área dois (c) área três	58
Figura 37 - Mapa de aspecto da área um	59
Figura 38 - Mapa de aspecto da área dois	60
Figura 39 - Mapa de aspecto da área três	60
Figura 40 - Distribuição do aspecto nas áreas de interesse (m ²)	61
Figura 41 - Distribuição do aspecto nas áreas de interesse (%)	61
Figura 42 - Mapa de declividade da área de estudo um	62
Figura 43 - Mapa de declividade da área de estudo dois	63
Figura 44 - Mapa de declividade da área de estudo três.....	63
Figura 45 - Mapa de Irradiação da área um no solstício de inverno	65
Figura 46 - Mapa de Irradiação da área um no solstício de verão	65
Figura 47 - Mapa de Irradiação da área dois no solstício de inverno.....	66
Figura 48 - Mapa de Irradiação da área dois no solstício de verão.....	66
Figura 49 - Mapa de Irradiação da área três no solstício de inverno	67
Figura 50 - Mapa de Irradiação da área três no solstício de verão	67

Figura 51 - Diferença dos valores medidos e estimados para o solstício de inverno (%)	70
Figura 52 - Diferença dos valores medidos e estimados para o solstício de verão (%)	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de albedo para diferentes superfícies.....	28
Tabela 2 - Planos de voo	41
Tabela 3 - Número de imagens coletadas	49
Tabela 4 - Características das nuvens densas de pontos geradas.....	51
Tabela 5 - Irradiação total nas coberturas para os solstícios de inverno e verão	64
Tabela 6 - Série histórica dos últimos dez anos dos dados de irradiação solar nas estações A810, 83907 e IRIOGRAN38	68
Tabela 7 - Comparação dos valores medidos e estimados	69

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	OBJTIVO GERAL.....	18
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	19
2.1	MÉTODOS DE AQUISIÇÃO DE DADOS GEOMÉTRICOS E APLICAÇÕES.....	19
2.2	MATRIZ ELÉTRICA E ENERGIAS RENOVÁVEIS	25
2.3	RECURSO SOLAR	27
2.4	AEROFOTOGRAMETRIA.....	30
2.4.1	Mapeamento com drones.....	32
2.4.2	Produtos da aerofotogrametria	33
2.5	SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA (SIG).....	34
2.6	SIG E ENERGIA SOLAR	36
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	37
3.1	MATERIAIS.....	38
3.2	MÉTODOS.....	39
3.2.1	Planejamento execução de coletas de dado em campo	40
3.2.2	Processamento no software Pix4D	43
3.2.3	Processamento no software QGIS	44
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	49
4.1	RESULTADOS DO PROCESSAMENTO NO SOFTWARE PIX4D.....	49
4.1.1	Nuvem Esparsa de pontos	49
4.1.2	Nuvem Densa de Pontos	51
4.1.3	Malha de Triângulos Irregulares	53
4.1.4	Ortomosaico.....	55
4.1.5	Modelo Digital de Superfície.....	57
4.2	RESULTADOS DO PROCESSAMENTO NO SOFTWARE QGIS	59
4.2.1	Mapas de Aspecto	59
4.2.2	Mapas de declividade	62
4.2.3	Irradiação Solar.....	64
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	71

REFERÊNCIAS	72
ANEXO A – Registro Sisant.....	77
ANEXO B – Solicitação de voo Sarpas.....	78
ANEXO C – Relatórios de Processamento das áreas um, dois e três	79

1 INTRODUÇÃO

Segundo Chiabrando et al. (2017) utilizar energia oriunda de fontes renováveis, como a solar, em ambientes urbanos, torna-se muito desafiadora por apresentar um elevado número de edifícios e poucos espaços disponíveis. Determinar superfícies adequadas para instalação de sistemas fotovoltaicos é uma questão fundamental. A gama de profissionais e administradores interessados nesses dados são de múltiplas competências, então faz-se necessário um sistema que forneça resultados confiáveis, através de um processo automático ou semiautomático.

Agugiaro et al. (2012) afirma ainda que sistemas fotovoltaicos necessitam estar localizados e orientados de forma apropriada para satisfazer as exigências de geração (tempo de insolação, orientação da superfície, tipo de painel, características da rede de energia, etc.). Para tal, os modelos fornecidos devem oferecer soluções válidas, otimizando a implementação de tecnologias solares. Esta tarefa se torna complexa por requerer uma variedade de dados de entrada de diferentes fontes, muitas vezes ausentes e incompletos, dentre eles: séries de dados meteorológicos, modelos geométricos dos edifícios e terrenos próximos. Outros fatores que podem influenciar na estimativa correta de irradiação solar em determinado ponto são as condições atmosféricas (turbidez do ar, nebulosidade, aerossol, vapor de água), topografia (sombreamento por colinas, montanhas, edifícios próximos, vegetação, etc.) e a eficiência do painel solar na conversão de irradiação solar em eletricidade.

De acordo com Freitas et al. (2015), em ambiente não urbano, as limitações da geração de energia solar estão relacionadas as condições meteorológicas desfavoráveis, já em espaços urbanos, nem sempre as estruturas são adequadas a implementação de painéis solares, devido principalmente a área limitada disponível e obstruções a entrada de luz solar, dificultando o alcance do potencial solar total. Dessa forma para implementar uma usina solar urbana, é necessário fazer a modelagem do recurso solar local e avaliar a efetividade do sistema. A metodologia que será escolhida dependerá do nível de detalhamento necessário e do objetivo final do projeto. Por exemplo, em telhados de pequena escala, são utilizadas estimativas diretas do potencial solar por métodos simples e generalistas, em contrapartida, pode-se realizar uma completa análise do ambiente urbano, levando em consideração as sombras, o que exige abordagens mais complexas e com maior confiabilidade.

Pela dificuldade de se obter modelos de superfície de áreas urbanas, tradicionalmente os estudos de radiação solar consideram apenas cenários não urbanos, conjuntos de coberturas ou edifícios isolados. Áreas não urbanas tem uma complexidade menor diante de áreas urbanas, onde o mapa de sombras leva em consideração qualquer elemento, como vegetação ou o mobiliário urbano (MACHETE, 2016).

1.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem por objetivo avaliar uma metodologia de mapeamento das coberturas de edifícios utilizando um RPA e estimar a irradiação total incidente sobre ela.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos do estudo são:

- Levantar os dados das coberturas dos edifícios da UFFS – Campus Cerro Largo com auxílio de drone.
- Processar os dados e gerar um Modelo Digital de Superfície (MDS) com dados altimétricos das coberturas.
- Estimar a irradiação solar incidente nas coberturas analisadas usando uma ferramenta SIG.

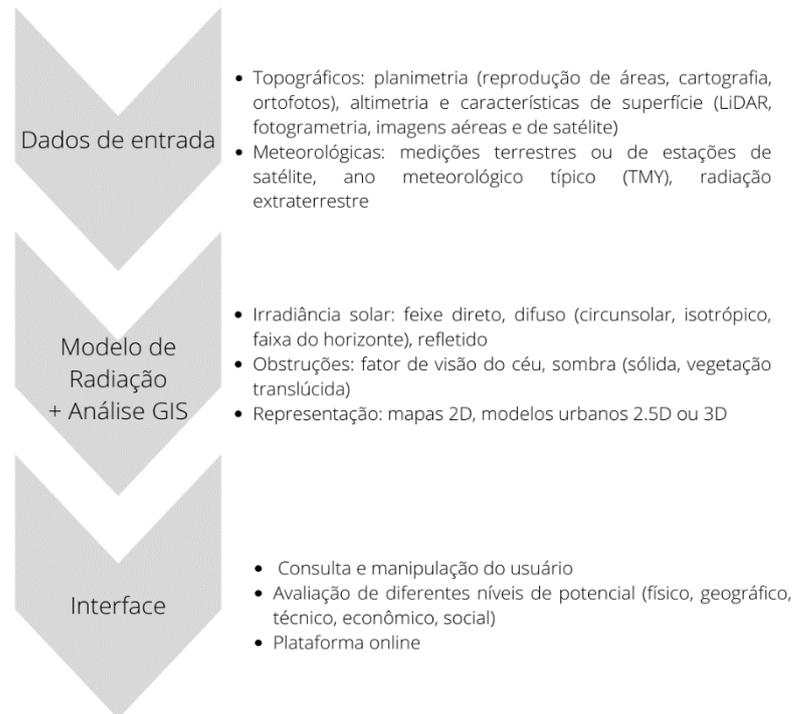
2 REVISÃO DE LITERATURA

Para manter a saúde ambiental do mundo, é essencial que ocorra a substituição gradual da geração de energia proveniente de fontes não renováveis, como combustíveis fósseis, para fontes renováveis. Os principais desafios dessa transição são infraestrutura envelhecida, políticas governamentais, pressões políticas, aceitação por pessoas comuns, custos de construção de fábricas, capacidade de oferta excessiva e influência corporativa. Vários países estão investindo esforços para tornar as energias renováveis mais acessíveis ao cidadão comum, incentivando a construção de infraestrutura e tecnologia adequada (KUMAR JAISWAL et al., 2022).

2.1 MÉTODOS DE AQUISIÇÃO DE DADOS GEOMÉTRICOS E APLICAÇÕES

O potencial solar físico e geográfico pode ser estimado realizando uma série de etapas, as quais estão demonstradas na Figura 1. Um Modelo Digital de Superfície (MDS) traz informações importantes sobre aspectos da área de estudo e sua região circundante, sempre que o projeto exigir um nível de detalhamento mais refinado. Podemos obter esses dados através de algumas técnicas, como imagens aéreas simples ou de satélite, Light Detection and Ranging (LiDAR) ou ainda, imagens estereoscópicas sobrepostas, que através da fotogrametria geram uma superfície digitalizada em uma nuvem de pontos 3D, permitindo a modelagem da região. Aplicações 2D, as quais são extraídas as áreas dos telhados, também podem ser usadas para estimar o potencial solar, de forma mais simples e menos precisa (FREITAS et al, 2015).

Figura 1 - Etapas e opções envolvidas na avaliação do potencial solar em um determinado local.



Fonte: Adaptado de Freitas et al. (2015).

Zhang et al. (2019), comparam alguns métodos utilizados para aquisição de dados geométricos no processo de avaliação de potencial fotovoltaico, dentre eles podemos destacar: desenhos, interface baseada na Web, parâmetros de planejamento urbano, RSDOM (Remote Sensing Digital Orthophoto Map), LiDAR e fotogrametria.

Ainda segundo os autores desenhos são comumente usados e envolvem a reprodução dos parâmetros geométricos das edificações, no entanto, não trazem informações precisas sobre o entorno da área, como árvores, arbustos e demais edifícios, podendo gerar um erro na análise do potencial fotovoltaico. Métodos de interface baseados na Web e parâmetros de planejamento urbano, podem ser usados em escala regional, mas teriam um nível de detalhamento baixo, sem resolver o problema das áreas circundantes. O método RSDOM consegue trazer informações rapidamente, porém não contempla dados altimétricos e os resultados acabam não sendo precisos. Através do método LiDAR, pode-se obter informações com rapidez e precisão, no entanto, o equipamento é relativamente caro, especialmente pelo uso de

aeronaves. Mesclar a fotogrametria com SIG (Sistema de Informação Geográfica), pode ser a solução para coletar informações abrangentes do ambiente construído, com alta precisão e a um custo acessível em comparação ao LiDAR.

Usando especialmente SIG em conjunto com MDS de variadas fontes de dados, muitos trabalhos têm sido desenvolvidos para obtenção de modelos em que as simulações de radiação solar levaram em consideração a complexidade do terreno e as formas do telhado. (FUENTES; MOYA; MONTOYA, 2020).

Chiabrando et al. (2017), obtiveram o MDS de uma região de Turim na Itália, através da fotogrametria, e estimou-se o seu potencial fotovoltaico, conforme Figura 2, segundo o autor os modelos provaram ser precisos o suficiente em relação aos valores considerados verdadeiros e coletados manualmente.

Figura 2 - Análise da radiação solar no mês de junho, na área de estudo em Turin, Itália.



Fonte: Chiabrando et al. (2017).

Santos et al. (2014) analisaram uma região chamada Alvalade, freguesia situada na cidade de Lisboa, Portugal. No estudo eles construíram o modelo 3D através do sistema LiDAR e determinaram o potencial fotovoltaico dos telhados da área, Figura 3. No estudo, os autores determinaram que 25% da demanda local por eletricidade pode ser suprida com a instalação de painéis solares e a maior parte do potencial solar da paisagem urbana se localiza em edifícios de múltiplos proprietários, levando a crer que para a implementação em larga escala, é necessária a aplicação de ações governamentais de incentivo a utilização de energia solar nesses imóveis. Também é destacado que para uma análise mais assertiva, a viável de renda dos

moradores deve ser levada em consideração, pois em regiões com maior potencial solar, caso seja habitada por cidadãos com menor poder aquisitivo, os mesmos dificilmente investirão em energia solar em suas residências, evidenciando a necessidade de políticas públicas.

Figura 3 - Eletricidade produzida por painéis fotovoltaicos em telhados residenciais.



Fonte: Santos et al. (2014).

Fuentes, Moya e Montoya (2020), realizaram um estudo de caso em um edifício localizado no Campus da Universidade de Cali, na Colômbia, o qual instalou recentemente painéis solares, os autores se propuseram a comparar os resultados obtidos através de aerofotogrametria com drone e os reais apresentados pelo sistema, também foi usado o modelo do software PVSyst para validar as informações, conforme observado no Quadro 1. O trabalho demonstrou que os dados coletados através da aerofotogrametria, obtiveram valores com variação de 7,05% para irradiação, já a produção de energia para o ano de 2019 apresentou uma diferença aproximadamente 17,5%. No trabalho foi estipulada a eficiência de 16.82% para os painéis solares, valor esse informado pela fabricante.

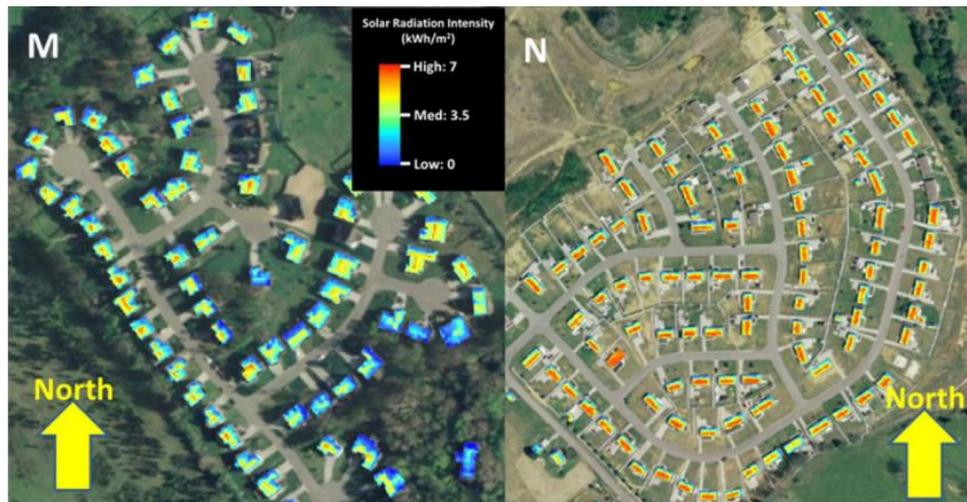
Quadro 1 - Diferenças nas variáveis relacionadas aos cálculos de irradiância solar a partir de dados de UAV, Estimativa de PVSyst e painéis solares.

Variável	Dados Drone-MDS (Área do painel solar)	Estimativa PVSyst	Valores reais medidos no Sistema Fotovoltaico
Irradiação média anual no telhado (kWh / m ²)	1417.98	1661.5	1317.88
Irradiação média mensal no telhado (kWh / m ²)	118.16	138.46	109.8
Irradiação média diária no telhado (kWh / m ²)	3.88	4.61	3.66
Produção de energia para o ano de 2019 (Wh / m ²)	1236.96	246.92	217
Produção média anual de energia (MWh) para 2019	1334.68	268.9	236.95

Fonte: Adaptado de Fuentes, Moya e Montoya (2020).

Kodysh et al. (2013) usou imagens obtidas através de LiDAR da cidade Knox County, Tennessee, USA. Nesse trabalho são comparadas regiões residenciais e comerciais, o autor destaca a influência do sombreamento da vegetação circundante às construções sobre o potencial fotovoltaico do telhado, Figura 4. Já os edifícios comerciais devido a maior área de cobertura oferecem um maior potencial de geração fotovoltaica que os residências, demonstrado na Figura 5.

Figura 4 - Uma comparação de estimativas de radiação solar para duas subdivisões residenciais diferentes.



Fonte: Kodysh et al. (2013).

Figura 5 - Demonstração da diferença nos valores de radiação solar entre telhados residenciais e comerciais.

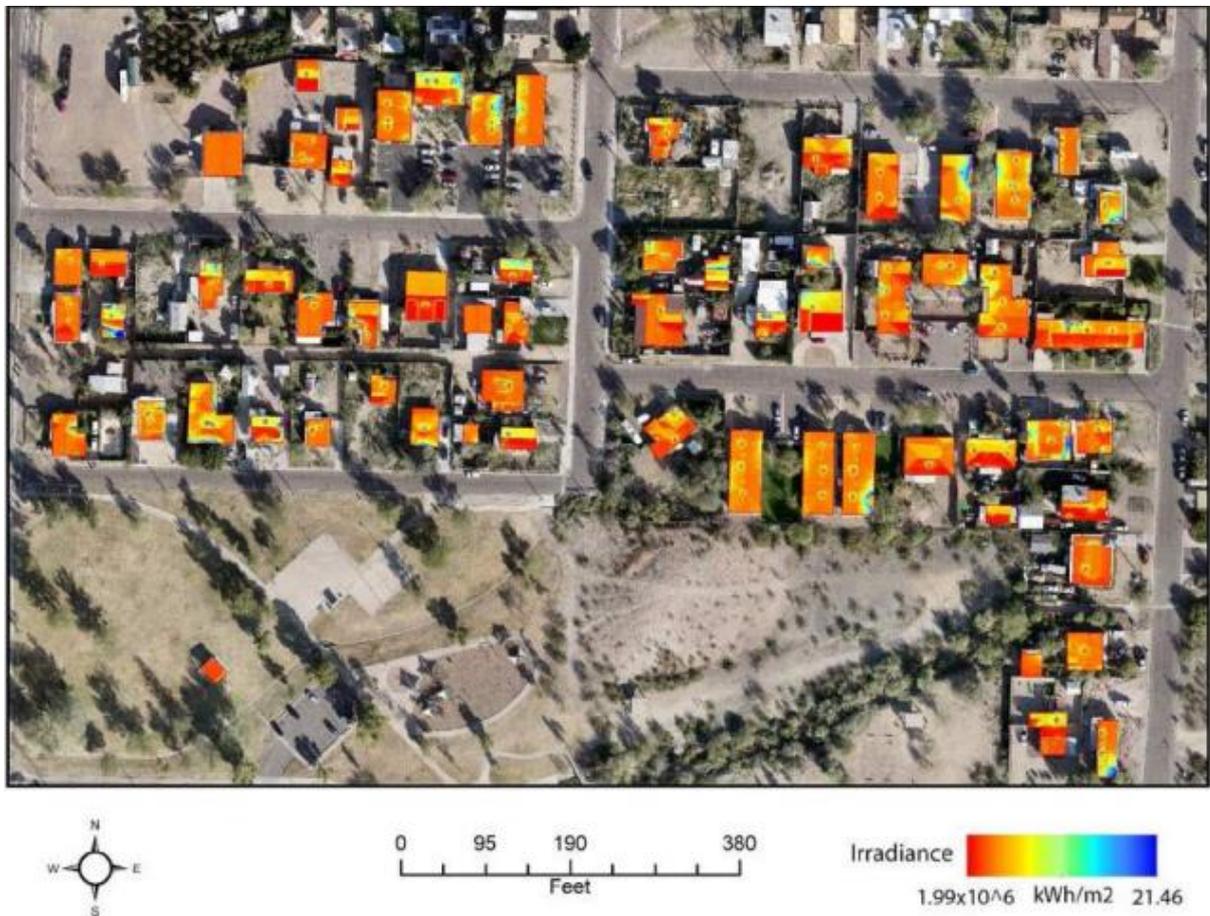


. Fonte: Kodysh et al. (2013).

Nelson e Grubestic (2020), desenvolveram sua pesquisa em um bairro denominado Sunnyslope na cidade de Phoenix, EUA e estimaram seu potencial fotovoltaico, conforme Figura 6. Os autores comparam dados coletados através da

fotogrametria e com a tecnologia LiDAR. Foi verificado que os dados coletados com LiDAR podem subestimar os potencial fotovoltaico em até 32%. Em contraponto, dados coletados a partir da fotogrametria com drones apresentam valores próximos ao que deveríamos esperar da área de estudo.

Figura 6 - Valores de irradiância solar dos telhados da área de estudo.



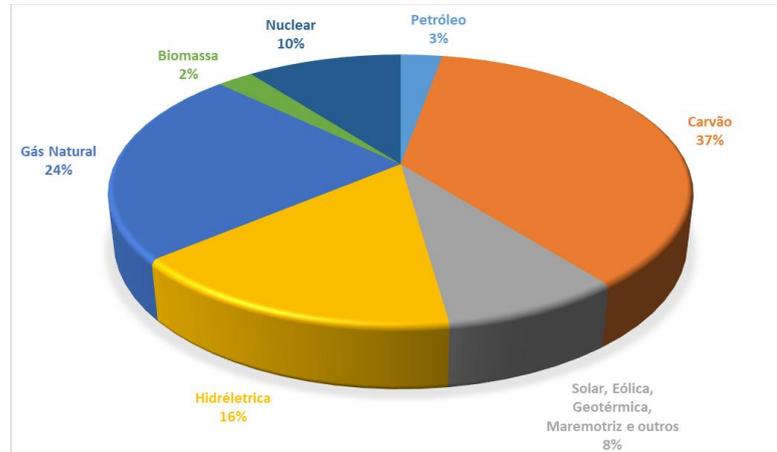
Fonte: Nelson e Grubestic (2020).

2.2 MATRIZ ELÉTRICA E ENERGIAS RENOVÁVEIS

A Empresa de Pesquisa Energética – EPE (2022), define matriz elétrica como o “conjunto de fontes disponíveis apenas para a geração de energia elétrica em um país, estado ou no mundo”. Leite (2013) afirma que energia renovável “é a energia que vem de recursos naturais como sol, vento, chuva, marés e energia geotérmica.” Segundo dados da Agência Internacional de Energia – EIA (2019), cerca de 26% da

energia elétrica produzida no mundo, provém de fontes renováveis, conforme a Figura 7.

Figura 7 - Matriz elétrica mundial

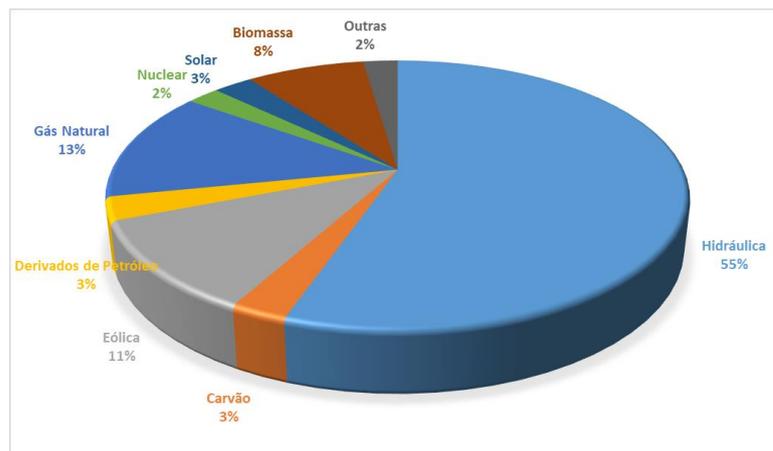


Fonte: Adaptado de EIA (2019)

No Brasil a situação é diferente, devido ao seu relevo e hidrografia, em 2021, cerca de 55% da energia consumida foi gerada a partir de fontes hidráulicas, do total, 79% da geração total foi advinda de fontes renováveis, como exemplificado na Figura 8 (EPE, 2022). É importante salientar que:

A escassez de chuvas em 2021 provocou uma redução do nível dos reservatórios das principais hidrelétricas do país e a consequente redução da oferta de hidreletricidade. Esta queda foi compensada pelo aumento da oferta de outras fontes, como o carvão vapor (+47,2%), gás natural (+46,2%), eólica (+26,7%) e solar fotovoltaica (+55,9%) (EPE, 2022).

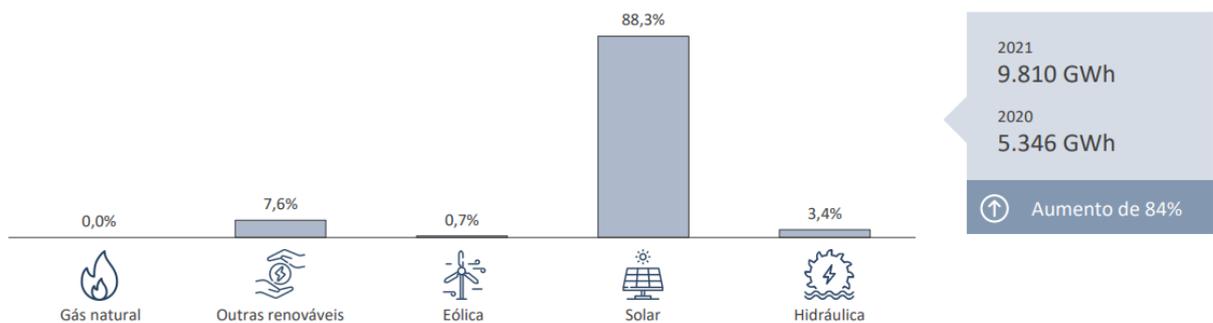
Figura 8 - Matriz elétrica brasileira



Fonte: Adaptado de EPE (2022)

Ainda de acordo com a EPE (2022), a Micro e Minigeração Distribuída (MMGD) obteve um crescimento de 84% em relação a 2020, sendo que 88,3% desse acréscimo foi representado pela energia solar fotovoltaica, totalizando 8.771 MW de potência instalada e 9.019 GWh de geração em 2021, conforme exposto na Figura 9.

Figura 9 - Micro e Minigeração distribuída em 2021.



Fonte: EPE (2022)

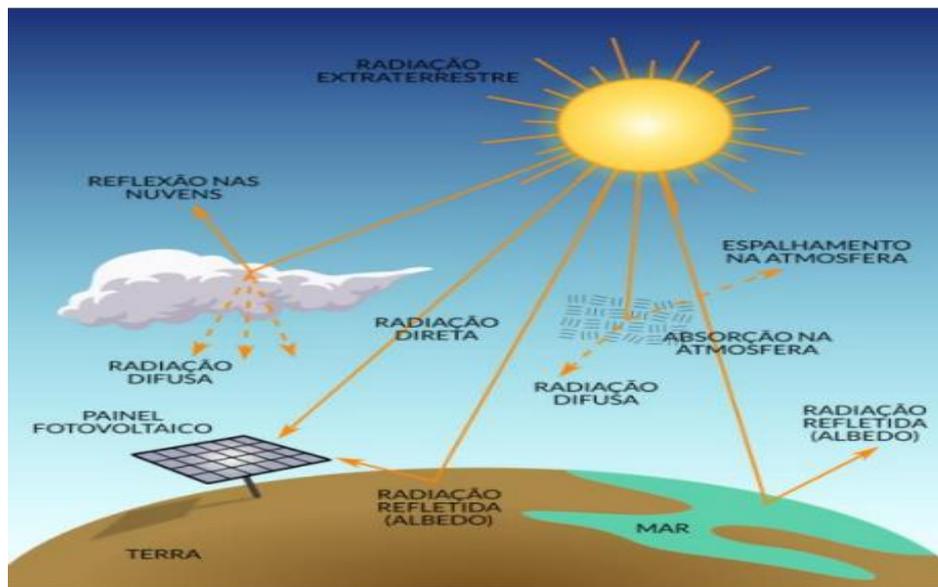
Devido aos problemas ambientais causados pelas emissões, a geração de energia tradicional baseada em combustíveis fósseis é geralmente considerada insustentável a longo prazo. Recursos energéticos renováveis tem enorme potencial e são opções inovadoras para a geração de eletricidade, pois podem, em princípio, atender muitas vezes a demanda energética mundial (ELLABBAN; ABU-RUB; BLAABJERG, 2014).

2.3 RECURSO SOLAR

Constante solar corresponde a densidade média anual do fluxo energético proveniente da radiação solar, medida num plano perpendicular à direção da propagação dos raios solares no topo da atmosfera terrestre, seu valor corresponde a 1.367 W/m². Cerca de 54% chegam diretamente a Terra, o restante é refletido ou absorvido pela atmosfera. A radiação solar chega à superfície terrestre e incide sobre uma superfície receptora, sendo ela constituída por uma componente direta, proveniente diretamente do Sol e uma difusa, resultado do espalhamento na atmosfera. Mesmo num dia sem nuvens, cerca de 20% da radiação que chega à

superfície é difusa, num dia totalmente nublado, 100% da radiação é difusa. O Albedo é terceira componente refletida pelo ambiente do entorno (solo, vegetação, obstáculos, terrenos rochosos, etc.) (PINHO e GALDINO, 2014). A irradiação global é dada pela soma das irradiâncias direta e difusa (SOUZA et. al, 2020). Na Figura 10, podemos observar a representação dos componentes da radiação solar.

Figura 10 - Componentes da radiação solar.



Fonte: Souza et al. (2020).

A Tabela 1 traz alguns valores de albedos conhecidos de diferentes superfícies.

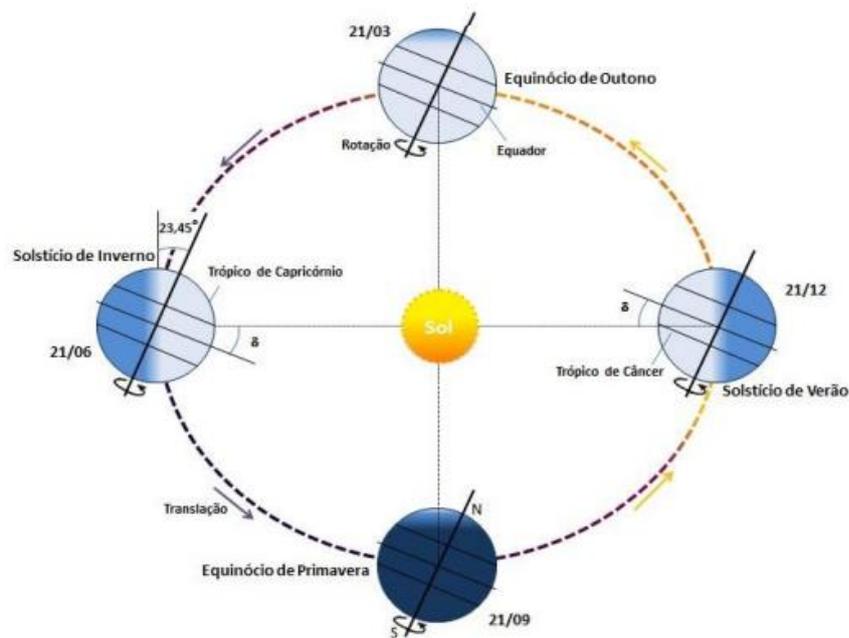
Tabela 1 - Valores de albedo para diferentes superfícies

Superfície	%
Solo	15-30
Floresta	5-20
Neve	40-90
Cidades	15-20
Nuvens	40-60
Oceano	02-10

Fonte: Adaptado de Bowker et al. (1985).

A Figura 11 demonstra movimento terrestre em torno do Sol, que descreve uma elíptica, faz com que a distância varie ao longo do ano, atingindo uma distância intermédia nos equinócios e uma distância máxima e mínima no solstício de verão do hemisfério sul e no solstício de inverno do hemisfério sul. O eixo terrestre que liga os polos mantém um ângulo constante de $23^{\circ}45'$ com o plano da elíptica, o que permite e existência de estações e diferentes períodos anuais de insolação (PINHO e GALDINO, 2014).

Figura 11 - Órbita da Terra em torno do Sol, com seu eixo inclinado em um ângulo de $23,45^{\circ}$, indicando as estações do ano no hemisfério Sul.



Fonte: Pinho e Galdino, 2014.

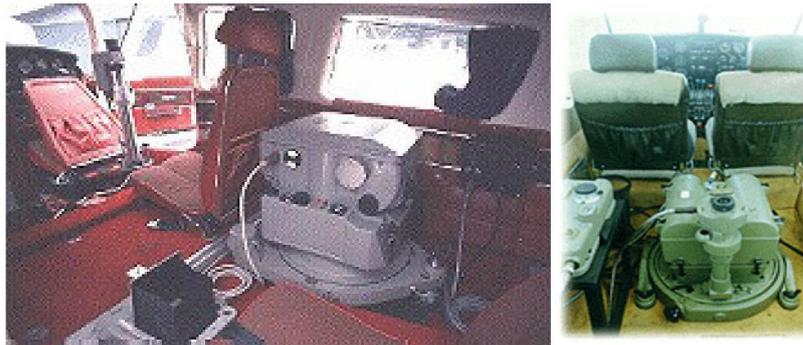
Pereira et al (2017), através de uma rede de estações meteorológicas desenvolveram o Atlas Brasileiro de Energia Solar, Figura 12, e disponibilizam uma base de dados pública sobre o potencial e a variabilidade espacial e temporal do recurso energético solar no território brasileiro.

Ainda segundo os autores, podemos classificar a fotogrametria em três categorias de acordo com o posicionamento do sensor, são elas: a terrestre, empregada na arquitetura, engenharia civil, controle industrial, entre outros, a aérea (aerofotogrametria), geralmente aplicada na área de geomática e a orbital que está relacionada a utilização de dados advindos de sensores embarcados em satélites.

A Fotogrametria aérea (ou Aerofotogrametria) é uma subdivisão da Fotogrametria, na qual as fotografias do terreno são tomadas por uma câmara de precisão montada em uma aeronave (TOMMASELLI, 2009).

Fontes (2005), afirma que aerofotogrametria faz referência ao ato de realizar operações de captação de imagens da superfície terrestre, através de fotografias e utilizando uma câmara de precisão com eixo ótico do sistema de lentes próximo da vertical acoplada em uma aeronave especialmente preparada, conforme Figura 13. Geralmente os produtos obtidos do mapeamento são utilizados para a cartografia, planejamento e desenvolvimento urbano, engenharias civil, agrônômica e florestal.

Figura 13 - Câmara aérea instalada na aeronave.



Fonte: Fontes (2005)

De acordo com Pina e Santos (2000), o voo fotogramétrico é executado tecnicamente a fim de se obter a cobertura aerofotogramétrica de uma determinada área, produzindo modelos estereoscópicos através de sobreposição de duas fotos sucessivas, Figura 14. A partir das imagens aéreas são extraídos os componentes planimétricos e altimétricos para a construção de um mapa.

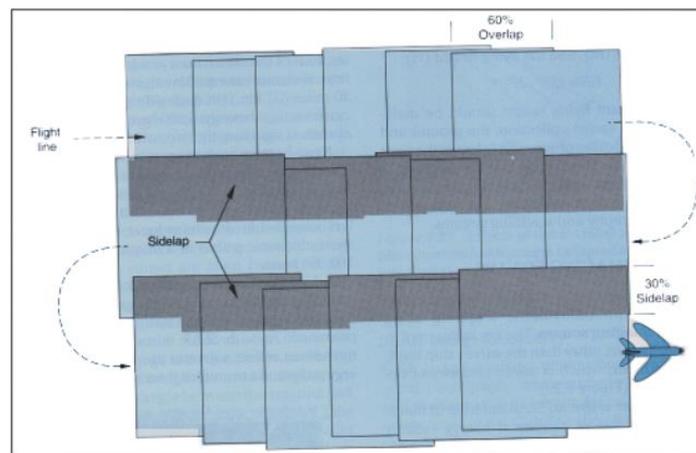
Figura 14 - Sequência de modelos estereoscópicos utilizados em aerofotogrametria.



Fonte: Pina e Santos (2000)

O plano de voo deve ser executado em faixas sobrepostas, bem como as fotografias, englobando toda área e compondo os blocos de fotografia, como ilustra a Figura 15. PINA e SANTOS (2000).

Figura 15 - Esquema de plano de voo com superposição de faixas de fotos.



Fonte: Robinson (1995)

2.4.1 Mapeamento com drones

O RPA é um tipo de veículo aéreo que não necessita de um piloto embarcado para ser guiado. Existem outras expressões utilizadas para designar este tipo de aeronave, como drone (zangão, em inglês), Remotely Operated Aircraft - ROA (Aeronave Operada Remotamente), Remote Piloted Vehicle - RPV (Veículo Pilotado Remotamente) e Unmanned Aerial Vehicle – UAV (PALERMO E LEITE, 2013).

RPA's estão se tornando parte integrante de operações vitais nos campos civil e militar. Com uma ampla gama de aplicações o uso de RPA's tem se expandido para variadas áreas como médicas, comerciais, entretenimento, comunicação e construção. Eles estão presentes em nossa vida com variedade de tamanhos, configurações, tempos de voo e altitudes (ALSUHLI; FAHIM; GADALLAH, 2022). Geralmente são equipados com um sistema de navegação GNSS e diferentes sensores fotográficos adequados para fotogrametria digital com elevada qualidade geométrica e radiométrica. Facilmente transportáveis, são capazes de decolar e aterrissar de forma simples e autônoma através de aplicativos e com um sistema de estabilização preciso. Essas características lhes permitem uma vasta gama de aplicações na vigilância, monitorização do meio ambiente e de infraestruturas, gerando informações de alta resolução como mapas, ortoimagens, topografia, modelos de elevação, detecção de obstáculos perigosos e modelos 3D de edificações e vegetação (AGOSTINHO, 2013).

De acordo com Ferreira (2014), o uso de drones tem crescido rapidamente devido à versatilidade desses equipamentos, o seu uso para levantamentos planialtimétricos possibilita a obtenção de dados em um curto intervalo de tempo a partir de imagens com resolução espacial de até 1cm, aumentando a capacidade produtiva e diminuindo custos.

É importante ressaltar que a legislação brasileira através da ICA 100-40 (2020) regulamenta o uso de drones no espaço aéreo brasileiro e determina que todo voo de aeronaves com mais de 250g deve ser informado ao Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA) através do sistema de Solicitação de Acesso de Aeronaves Remotamente Pilotadas (SARPAS).

2.4.2 Produtos da aerofotogrametria

A partir do processamento dos dados coletados podemos gerar alguns produtos, dentre eles podemos citar a Nuvem de Pontos, a Malha de Triângulos Irregulares, o Modelo Digital de Superfície (MDS), o Modelo Digital de Terreno (MDT) e o ortomosaico. Os softwares usados na geração operam com algoritmos baseados

em Structure-from-Motion (SfM), que é o processo de reconstrução de estruturas 3D a partir de projeções em uma série de imagens tiradas de diferentes pontos de vista (SCHÖNBERGER E FRAHM, 2016).

Nuvem de pontos é um conjunto de pontos em um espaço 3D, cada um com dados associados em relação ao valor dos dois ângulos (phi e theta) usados na aquisição, por exemplo, cor, propriedades do material e/ou outros atributos, podem ser usadas para reconstruir um objeto ou uma cena como uma composição de tais pontos (MEKURIA; LI, e TULVAN, 2016).

A Malha de Triângulos Irregulares utiliza os pontos de amostra originais para constituir muitos triângulos não sobrepostos que cobrem toda a região de acordo com um conjunto de regras (HALDAR, 2013).

Uma representação tridimensional digital da superfície topográfica é conhecida como Modelo Digital de Elevação ou Modelo Digital de Superfície (OLIVEIRA E TOMMASELLI, 2014). O Modelo Digital de Terreno (MDT) é um modelo de superfície terrestre “nua”, supostamente livre de árvores, edifícios ou outros objetos (ZHOU, 2017).

Ortomosaico é o conjunto de fotografias aéreas com superposição, cujas margens são, em geral, aparadas, cortadas e unidas entre si, visando à formação duma representação fotográfica contínua de uma parte da superfície terrestre (OLIVEIRA, 1993).

2.5 SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA (SIG)

Aronoff (1989), define SIG como "Um conjunto manual ou computacional de procedimentos utilizados para armazenar e manipular dados georeferenciados".

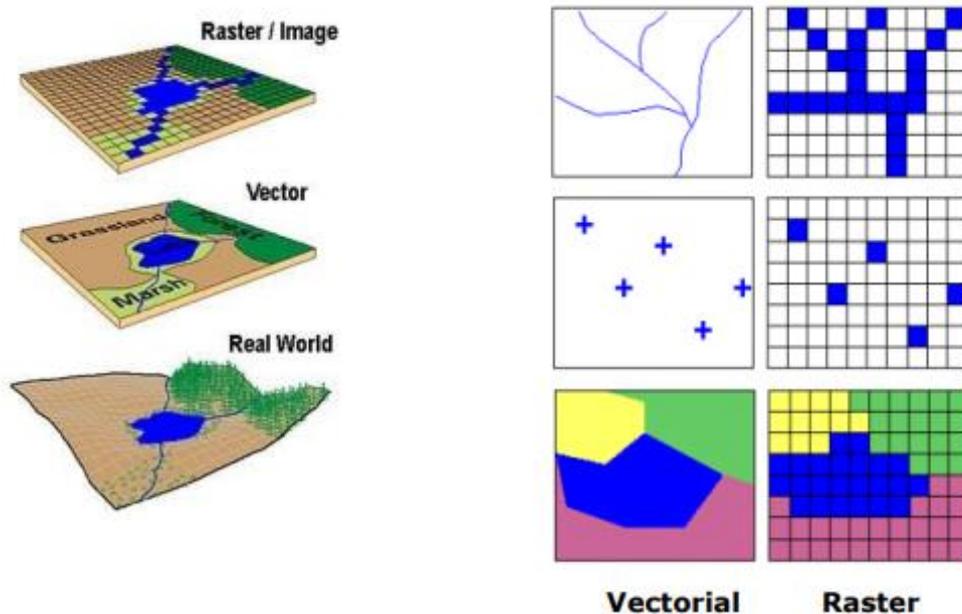
Um SIG pode ser definido como um sistema destinado à aquisição, armazenamento, manipulação, análise, simulação, modelagem e apresentação de dados referidos espacialmente na superfície terrestre, integrando diversas tecnologias, serve de instrumento eficiente para todas as áreas do conhecimento que fazem uso de mapas, possibilitando: integrar em uma única base de dados informações representando vários aspectos do estudo de uma região; permitir a entrada de dados de diversas formas; combinar dados de diferentes fontes, gerando

novos tipos de informações; relatórios e documentos gráficos de diversos tipos, etc. (ROSA, 2013).

Cavalcante (2015) afirma que a representação do mundo real codificada é representada por modelos de dados com localização espacial, georreferenciação e um conjunto de descritores quantitativos e qualitativos, conforme Figura 16. Podem ser nos formatos:

- vetorial, que é dividido em entidades (pontos, linhas e polígonos) e indicado para representações com distribuição espacial exata (localização de pontos de captação de água, estradas, usos do solo, etc.)
- modelo de dados matricial ou raster, o espaço é composto por células ou pixels, às quais está associado um valor, representando uma superfície contínua de variação de um dado atributo de interesse, indicados para representações de grandezas com distribuição espacial contínua (pressão atmosférica, temperatura etc.).

Figura 16 - Representação do mundo real, em modelos de dados vectoriais e raster



Fonte: Cavalcante (2015)

2.6 SIG E ENERGIA SOLAR

O desenvolvimento de modelos que integrem o SIG com a análise multicritério podem determinar localizações ideais para a captação de energia solar, aumentando a eficiência dos painéis fotovoltaicos, maximizando a geração de energia e minimizando os custos (BALAGUER e ALVES, 2021). A irradiação solar na superfície terrestre pode ser medida através de estações meteorológicas, por satélites meteorológicos ou através de modelos solares gerados a partir de SIG (FERNANDES, 2015).

No Brasil, o uso de tecnologias de sensoriamento remoto para aferição de radiação solar se torna necessária por conta do vasto território e os altos custos dos equipamentos para medição direta, de forma que seria inviável manter uma rede solarimétrica, algo que ocorre de forma regular somente em instituições e centros de pesquisa (FEITOSA, 2022).

O módulo *r.sun*, baseado em (Hofierka e Suri, 2002), foi implementado no GRASS GIS (*Geographic Resources Analysis Support System*), e calcula os mapas raster de irradiação solar direta, difusa e refletida no solo para um determinado dia, latitude, superfície e condições atmosféricas (TEVES, et al., 2015). A ferramenta é capaz de estimar a quantidade de irradiância solar global em todos os seus componentes para qualquer ponto da superfície terrestre representado por um modelo digital de superfície (HOFIERKA; GALLAY; ONAČILLOVÁ, 2020).

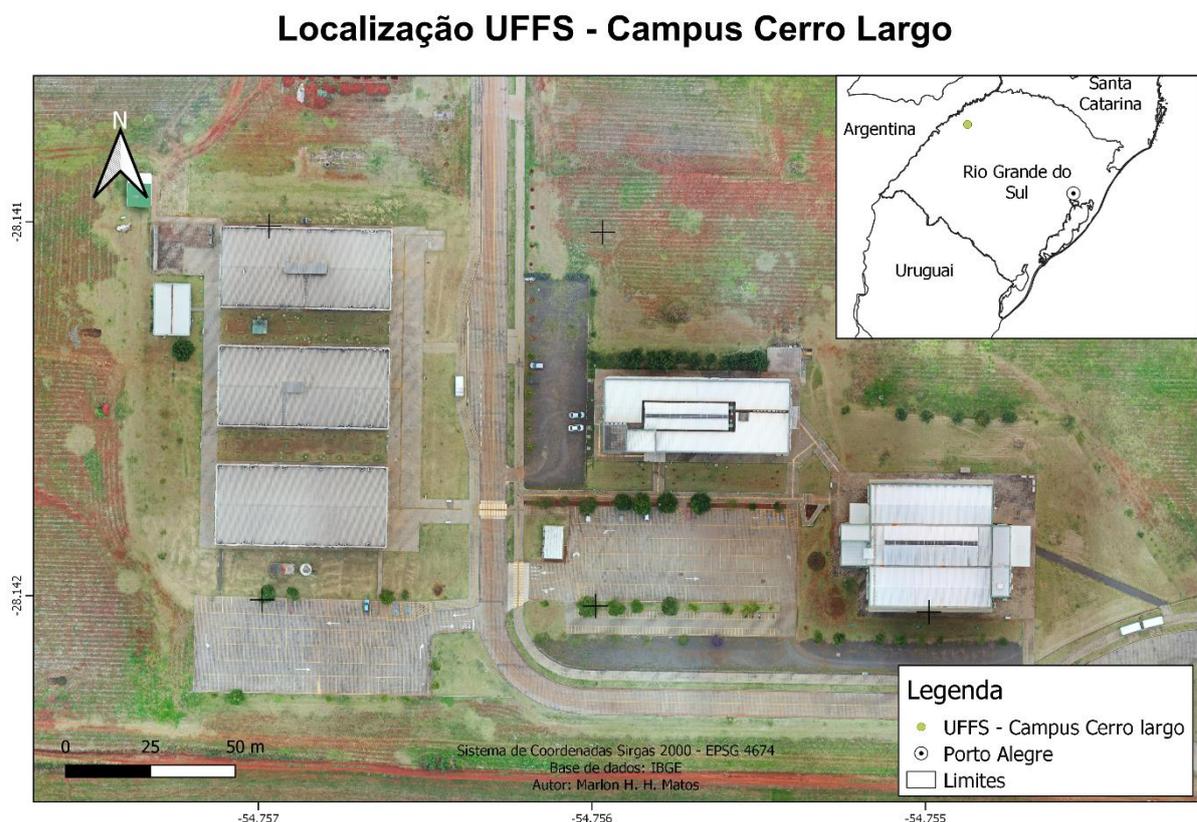
Os desenvolvedores do Grass Gis (2022) afirmam que a ferramenta *r.sun*, presente no software QGIS:

Calcula mapas raster de irradiação solar de feixe (direto), difuso e refletido no solo para um determinado dia, latitude, superfície e condições atmosféricas... A geometria solar do modelo é baseada nos trabalhos de Krcho (1990), posteriormente aprimorados por Jenco (1992). As equações que descrevem a posição Sol-Terra, bem como a interação da radiação solar com a atmosfera, foram originalmente baseadas nas fórmulas sugeridas por Kitler e Mikler (1986). Este componente foi consideravelmente atualizado pelos resultados e sugestões do grupo de trabalho coordenado por Scharmer e Greif (2000). O modelo calcula todos os três componentes da radiação global (feixe, difusa e refletida) para as condições de céu claro, ou seja, não levando em consideração a variação espacial e temporal das nuvens.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Esta etapa descreve os materiais e procedimentos para a realização do estudo, o qual foi dividido em 2 fases, a primeira relacionada ao planejamento e coleta dos dados em campo na Universidade Federal da Fronteira Sul – Campus Cerro Largo, localizado no Rio Grande do Sul, conforme a Figura 17, e a segunda etapa consistiu no processamento e análise dos dados coletados.

Figura 17 - Mapa de Localização da Universidade Federal da Fronteira Sul - Campus Cerro Largo



Fonte: Autor

O município de Cerro Largo situa-se na região noroeste do estado do Rio Grande do Sul, distante cerca de 498km da capital, Porto Alegre, possui como municípios limítrofes: Campina das Missões, Ubiretama, Guarani das Missões, Mato Queimado, Rolador e Salvador das Missões. De acordo com o IBGE (2010), apresenta uma população de 13.289 habitantes, área de 177,674 km² e está a uma altitude de 211 metros do nível do mar. Conforme dados do Climate-Data (2022), Cerro Largo

apresenta um clima quente e temperado com grande volume de chuvas (1894mm/ano) e temperatura média de 20,5°C, classificada como Cfa (Clima subtropical, com verão quente) por Köppen e Geiger.

3.1 MATERIAIS

Como já mencionado, o estudo procedeu em duas etapas. Na primeira etapa, de coleta dos dados, foram utilizados os itens a seguir:

- Drone DJI Mavic 2 Pro, conforme Figura 18.
- Smartphone Motorola G8 Plus
- Aplicativo Pix4D Capture
- Aplicativo UAV Forecast

Na segunda etapa, na qual foi realizado o processamento das imagens, foram empregados os seguintes itens:

- Notebook Acer, modelo Aspire A315-42G, processador AMD Ryzen 5 3500U with Radeon Vega Mobile Gfx, 2100 Mhz, 4 Núcleo(s), 8 Processador(es) Lógico(s), RAM: 24GB.
- Software Pix4D, licença *Shareware*
- Software QGIS 3.10

Figura 18 - DJI Mavic 2 Pro

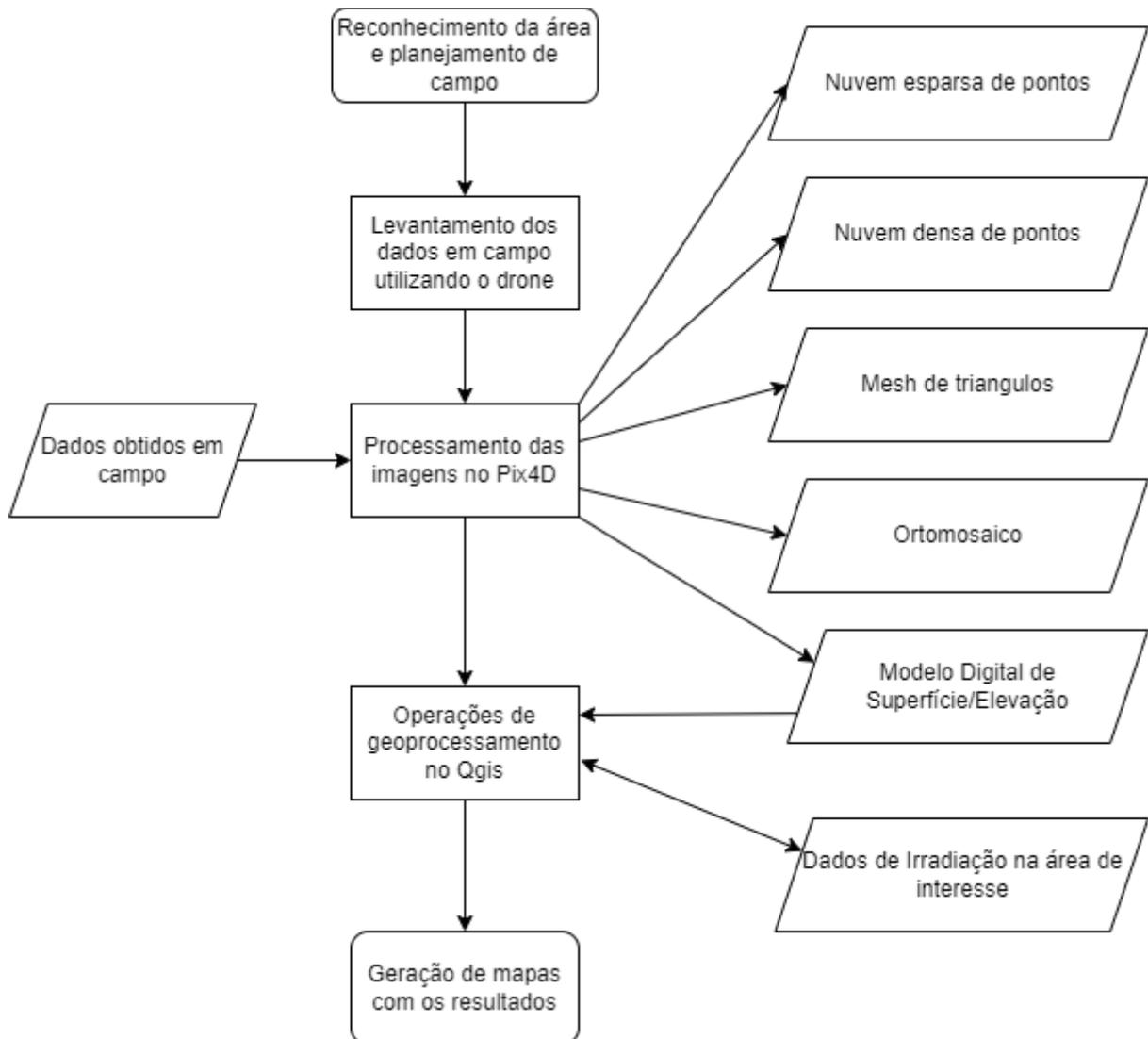


Fonte: DJI (2022)

3.2 MÉTODOS

A Figura 19 expressa as etapas do processo metodológico através de um fluxograma.

Figura 19 - Fluxograma de etapas da metodologia



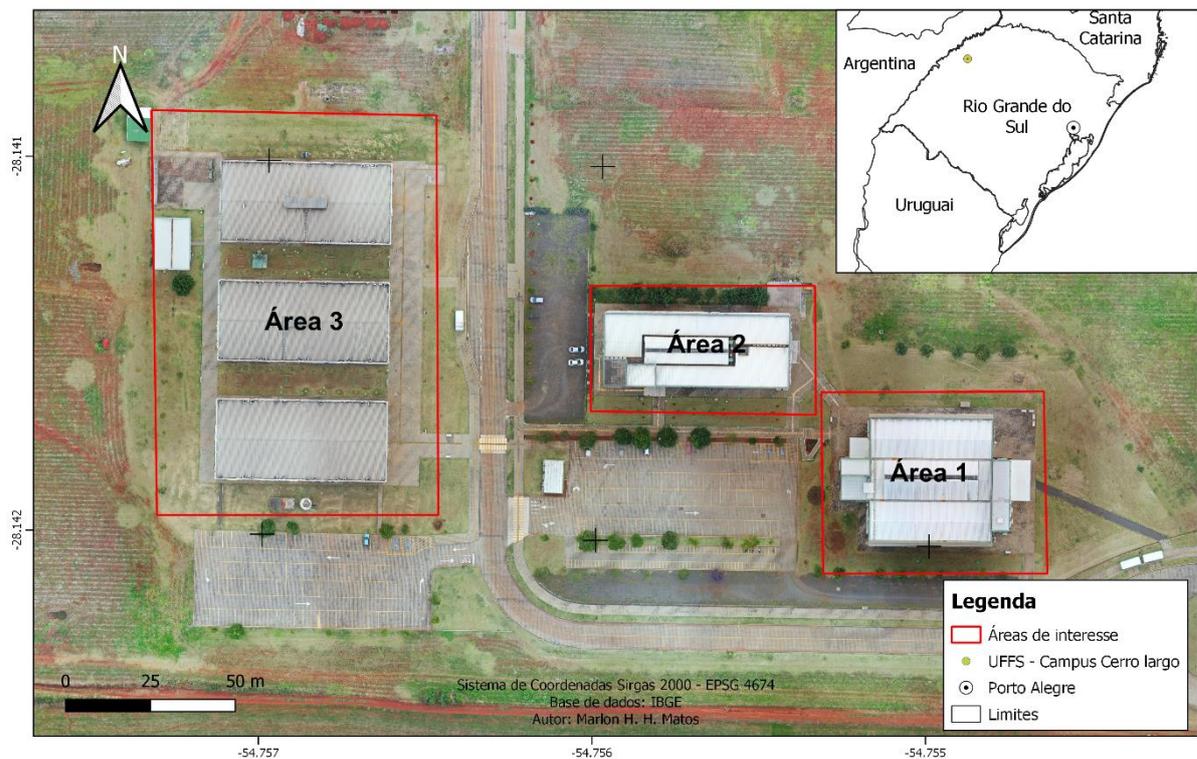
Fonte: Autor

3.2.1 Planejamento execução de coletas de dado em campo

A primeira etapa de execução metodológica consiste na elaboração dos planos de voo para um melhor mapeamento das feições dos telhados, devido a isso optou-se por dividir a região de interesse em 3 áreas distintas, como apresentado na Figura 20.

Figura 20 - Áreas de interesse

Áreas de interesse UFFS - Campus Cerro Largo



Fonte: Autor

Após definidas as áreas de interesse, foram elaborados os planos de voo com o intuito de capturar as feições das coberturas dos edifícios, bem como suas inclinações, no total, cada área recebeu dois planos de voo, totalizando seis missões com as características presentes na Tabela 2.

Tabela 2 - Planos de voo

Parâmetro	Missão Grid	Missão Grid Duplo
Altura de voo	90m	70m
Velocidade	5 m/s	5 m/s
Sobreposição frontal / lateral	80% / 80%	80% / 80%
Inclinação da câmera	90°	65°
GSD esperado	2,11cm	1,81cm

Fonte: Autor

As missões foram elaboradas no aplicativo Pix4dCapture. Na Figura 21 podemos vê-las no tipo Grid e Grid Duplo, respectivamente, para a área três.

Figura 21 - Capturas de tela do plano de voo para a área três



Fonte: Autor

Previamente a coleta dos dados, utilizou-se o aplicativo UAV Forecast que traz informações do tempo e podemos verificar as condições de voo da região, um exemplo de captura de tela pode ser vista na Figura 22.

É importante ressaltar que o todo procedimento seguiu a legislação presente na RBAC-E nº 94 (ANAC, 2017), com o registro do drone no Sistema de Aeronaves não Tripuladas – SISANT, disponível no Anexo A, bem como a de autorização de voo junto ao Sarpas do Departamento de Controle do Espaço Aéreo, conforme Anexo B.

Figura 22 - Aplicativo UAV Forecast



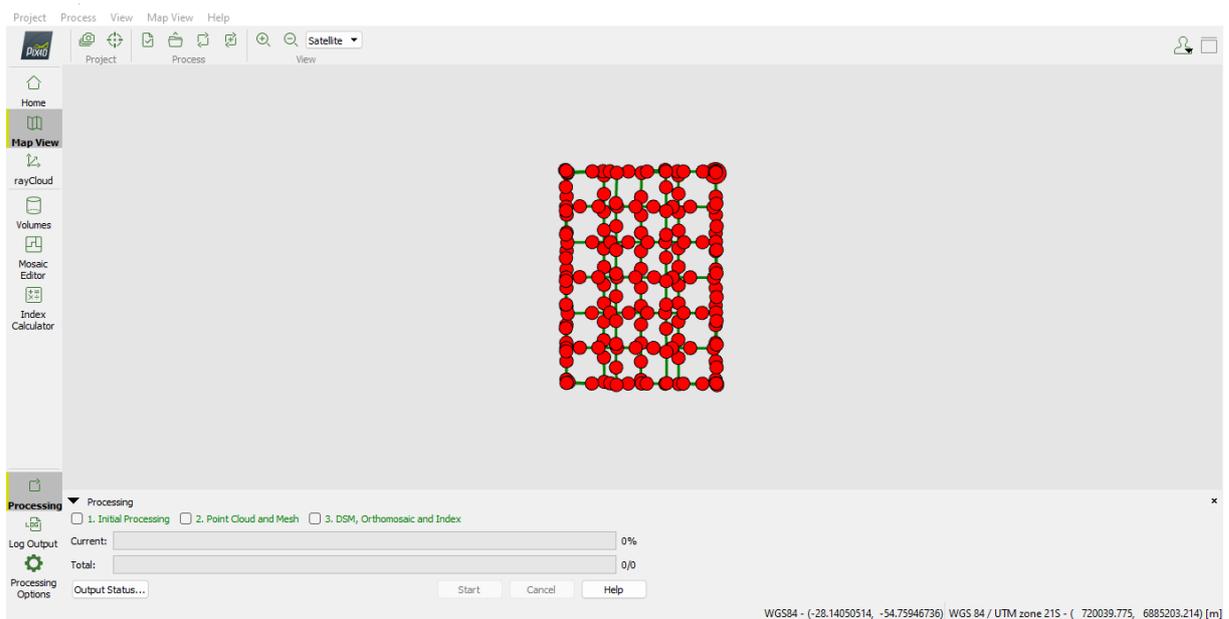
Fonte: Autor

As seis missões foram então realizadas e os dados coletados para dar sequência a próxima fase.

3.2.2 Processamento no software Pix4D

A etapa após a coleta dos dados consistiu no processamento das imagens no software Pix4dmapper, o qual pode ser dividido em três fases, a primeira consiste no alinhamento das imagens e geração da nuvem esparsa de pontos, nela podemos analisar erros de projeções causados por problemas na captura das imagens, na Figura 23, temos um exemplo de tela do software após as imagens serem carregadas. Em seguida é construída a nuvem densa de pontos e a malha de triângulos irregulares, onde as feições da nossa área de interesse podem ser melhor visualizadas e verificados erros na construção do modelo. A terceira e última etapa compreende a geração do ortomosaico e do modelo digital de superfície que serviu como base para a próxima etapa do processo. O Anexo C traz os parâmetros de processamento utilizados nesse projeto.

Figura 23 - Software Pix4d



Fonte: Autor

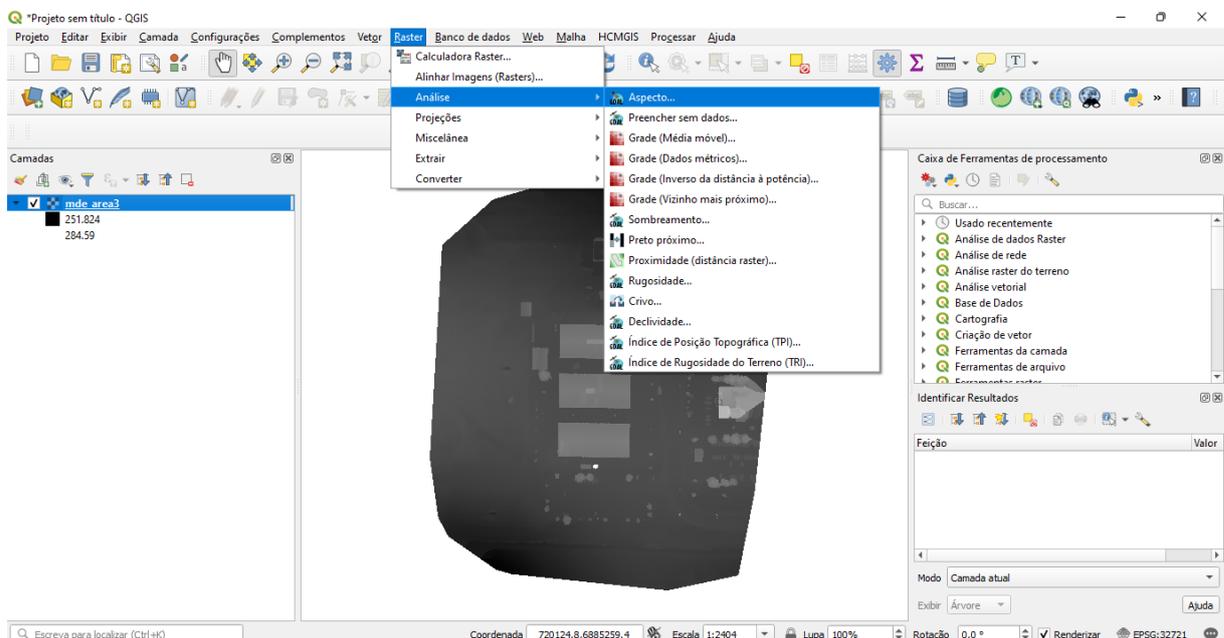
3.2.3 Processamento no software QGIS

Com o modelo digital de superfície (MDS) gerado, passamos para o próximo passo, o qual são realizadas operações de geoprocessamento, no software QGIS, para estimarmos a irradiação nas áreas de interesse. Para chegarmos nos resultados esperados foi utilizada a ferramenta r.sun.

Porém antes de chegar no objetivo, precisamos gerar a partir do MDS outros dados necessários para a ferramenta, sendo eles o aspecto, que nos retornou as orientações dos telhados em pontos cardeais, e o declive que nos indicou a inclinação das coberturas.

A operação de aspecto foi realizada através da barra de tarefas no menu Raster > Análises > Aspecto, conforme a Figura 24.

Figura 24 - Caminho para geração do aspecto no software QGIS



Fonte: Autor

Em seguida, na janela retornada, foi adicionado o MDS no campo camada de entrada, existe a opção de salvar a camada resultante ou não, e então foi gerada a camada de orientações do telhado, clicando em executar, conforme a Figura 25.

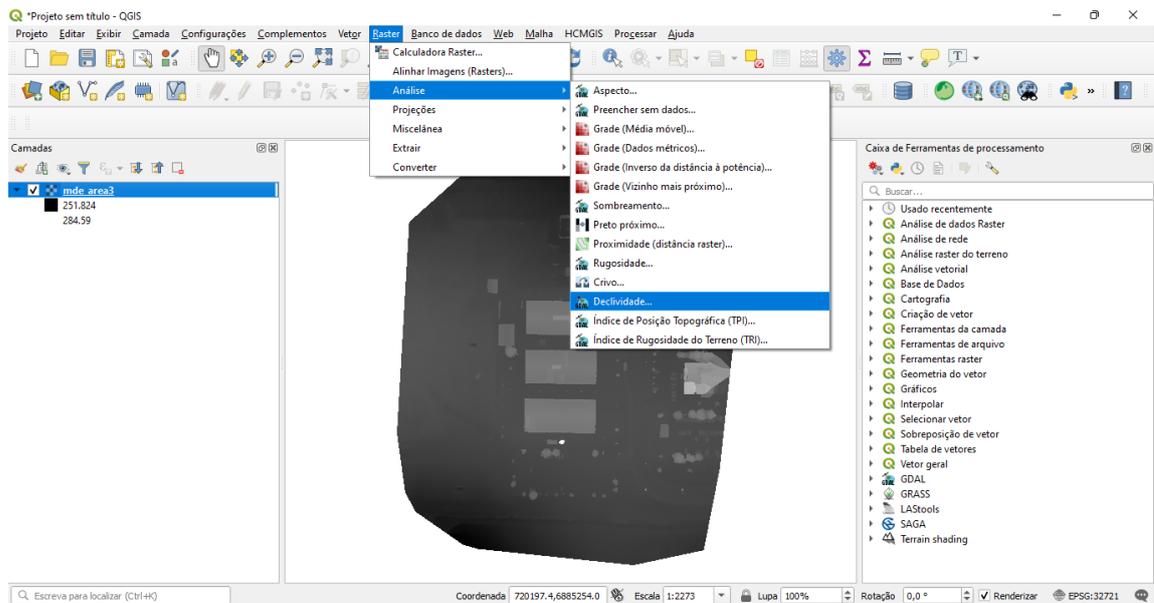
Figura 25 - Geração da camada de aspecto.



Fonte: Autor

Já a declividade é gerada a partir da barra de tarefas no menu Raster > Análise > Declividade, conforme a Figura 26.

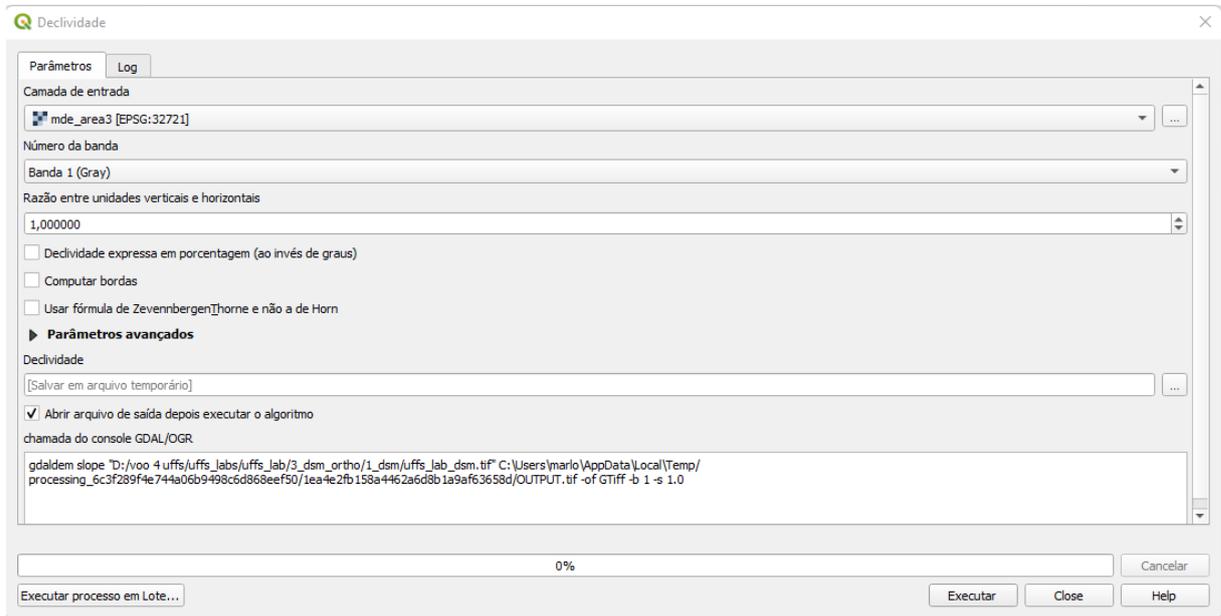
Figura 26 - Caminho para geração da declividade no software QGIS



Fonte: Autor

Na sequência adicionamos o MDS no campo camada de entrada, os demais parâmetros não são alterados, novamente temos a opção de salvar a camada de saída, e clicando em executar temos a camada de declividade, Figura 27.

Figura 27 - Geração da camada de declividade.

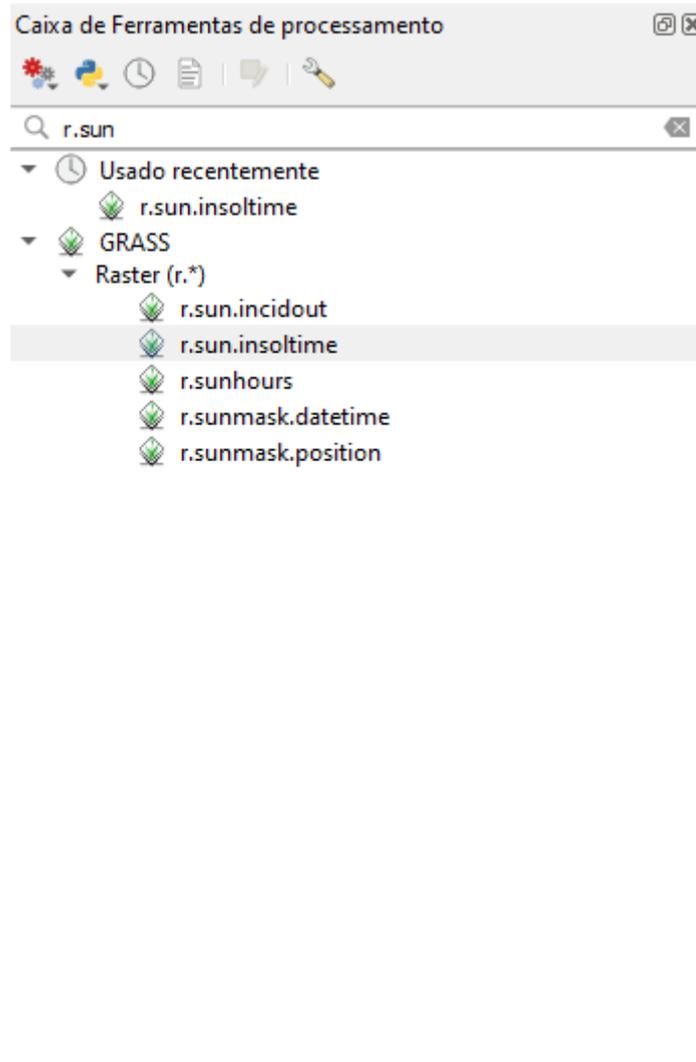


Fonte: Autor

Essa sequência de processamentos foi replicada para as três áreas de interesse.

Após a geração dos dados de aspecto e declividade pode-se seguir para criação da camada com os dados de irradiação solar, para isso, como já mencionado, usamos a ferramenta r.sun que pode ser encontrada na caixa de ferramentas no QGIS, para isso basta digitar “r.sun” no campo de pesquisa e clicar em r.sun.insoltime, conforme demonstrado na Figura 28. Essa funcionalidade é usada para modelar a irradiação solar na área de interesse em um determinado dia do ano.

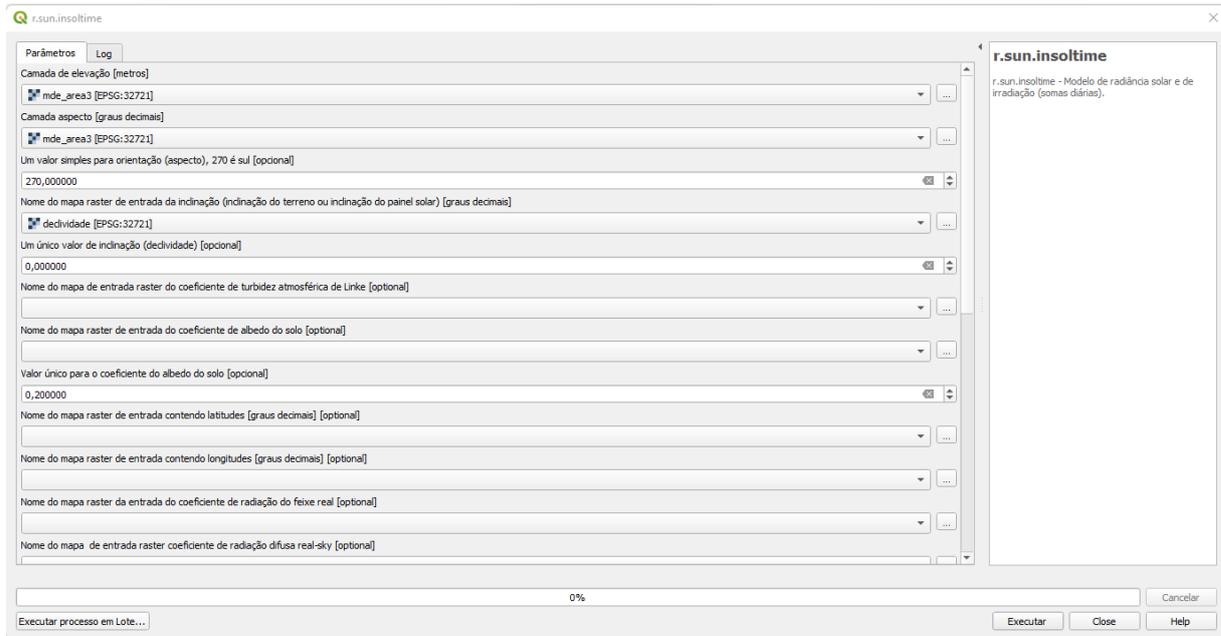
Figura 28 - Ferramenta r.sun



Fonte: Autor

Na tela seguinte foram adicionadas as camadas de MDS, aspecto e declividade nos seus respectivos campos, conforme a Figura 29, e escolhidas as datas as quais foram feitas as análises, os demais parâmetros não foram alterados. Para esse projeto foram usadas as datas de solstícios de inverno e verão, 21 de junho e 21 de dezembro, respectivamente. Executou-se a operação e procedeu-se para a análise dos resultados.

Figura 29 – Geração da camada de Irradiação



Fonte: Autor

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como resultado das seis missões de aerolevanteamento, obtivemos o total 357 imagens as quais estão divididas conforme demonstrado na Tabela 3.

Tabela 3 - Número de imagens coletadas

Tipo de voo	N° de imagens			
	Área 1	Área 2	Área 3	Total
Grid	28	24	42	94
Grid Duplo	65	69	129	263
Total	93	93	171	357

Fonte: Autor

A partir das imagens processadas, foram gerados alguns produtos que podem ser usados para mais diversas funcionalidades.

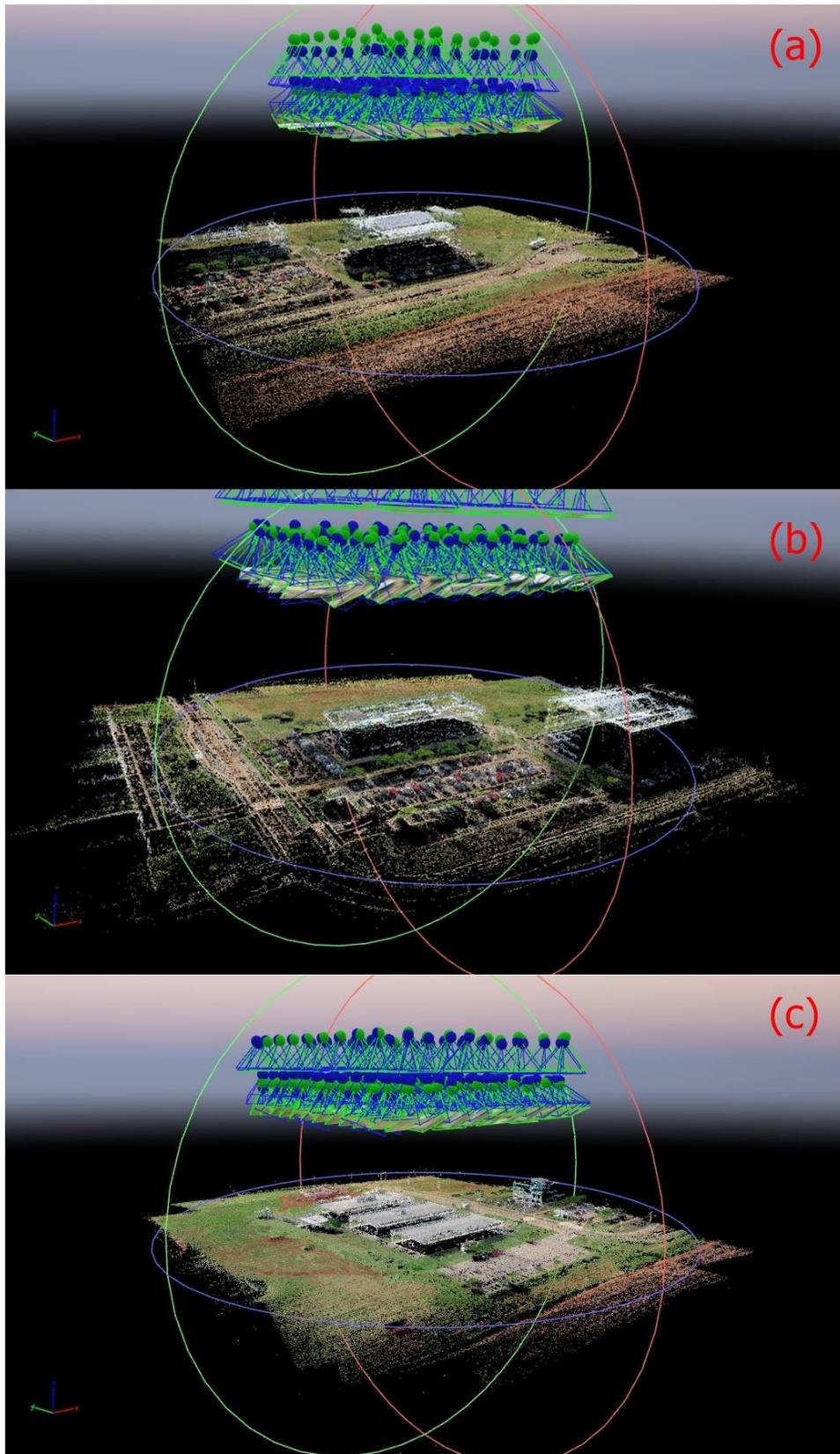
4.1 RESULTADOS DO PROCESSAMENTO NO SOFTWARE PIX4D

A partir do processamento no software Pix4d, 5 produtos são gerados para nosso trabalho, são eles: nuvem esparsa de pontos, nuvem densa de pontos, malha de triângulos irregulares, ortomosaico e modelo digital de superfície.

4.1.1 Nuvem Esparsa de pontos

O primeiro produto obtido é a nuvem esparsa de pontos, expressa **Erro! Fonted e referência não encontrada.**, para as áreas um, dois e três, respectivamente. Segundo a fabricante do software Pix4d (2022), são pontos 3D automaticamente detectados e combinados nas imagens. Ainda segundo a fabricante, os outliers gerados não podem ser removidos manualmente, e podem ocorrer devido a alguns aspectos do levantamento como a velocidade de captura das imagens, altura do voo, refletância dos objetos entre outros.

Figura 30 - Nuvens esparsas de pontos geradas no software Pix4d (a) área um (b) área dois (c) área três.



Fonte: Autor

4.1.2 Nuvem Densa de Pontos

Em seguida foram geradas as nuvens densas de pontos para nossas áreas de interesse, conforme a **Erro! Fonte de referência não encontrada.** Pode-se observar que os planos de voo priorizaram a coleta de dados das coberturas dos edifícios, e não de suas fachadas. As características de cada uma podem ser observadas na Tabela 4. A nuvem densa de pontos que pode ser usada para cálculo de volumes, classificação da área de interesse, entre outros. No nosso caso, ela serviu de base para a geração do MDS.

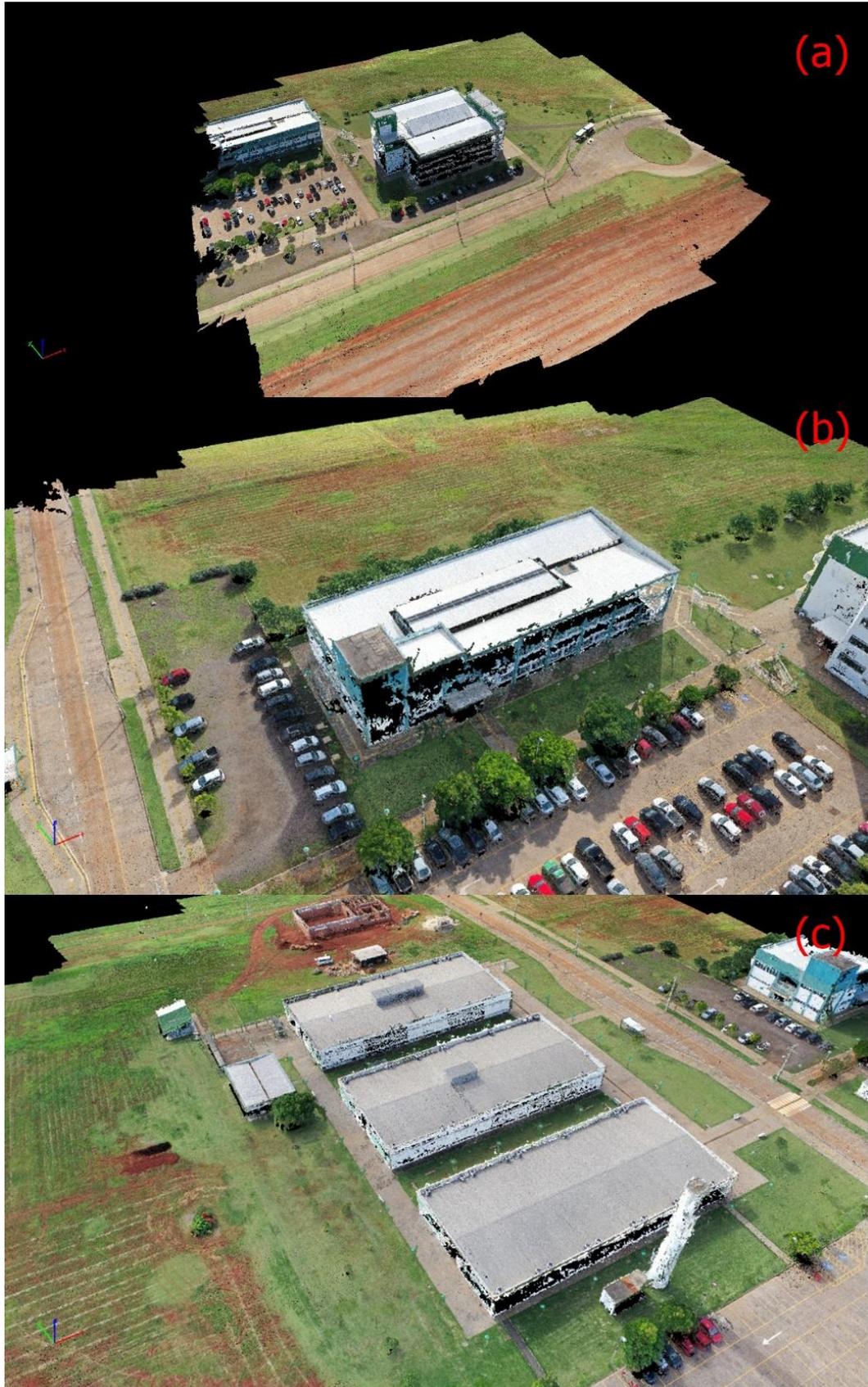
Tabela 4 - Características das nuvens densas de pontos geradas

Atributo	Área 1	Área 2	Área 3
Nº de pontos	10438066	41391790	78721921
Densidade de pontos por m ³	475.61	1294.44	788.27
Área coberta (ha)	4,51	4,05	6,28

Fonte: Autor

A nuvem densa de pontos gerada apresenta alguns outliers e a sua remoção eficiente torna-se uma etapa essencial do pré-processamento (GE; FENG, 2022). Sendo assim, foi realizada a limpeza dos pontos espúrios presentes das nuvens densas das três áreas de interesse, conforme o exemplo demonstrado na Figura 32.

Figura 31 - Nuvens densas de pontos geradas no software Pix4d (a) área um (b) área dois (c) área três.



Fonte: Autor

Figura 32 – Exemplo de remoção de *outliers* da nuvem densa de pontos



Fonte: Autor

4.1.3 Malha de Triângulos Irregulares

Na Figura 33, podemos ver as malhas de triângulos irregulares geradas para as áreas um, dois e três.

Através da malha de triângulos irregulares conseguimos uma melhor visualização de erros de projeção, os quais não foram sanados na limpeza dos outliers na etapa anterior, conforme Figura 34. É importante salientar que os erros de projeção terão influência na modelagem do potencial do solar da área interesse.

Nos estudos de potencial energético solar de edifícios urbanos, em que se pretende analisar toda as fachadas do edifício, e não apenas as coberturas, a abordagem 3D é mais eficaz que a abordagem 2,5D. (MACHETE et al., 2018)

Figura 33 - Malhas de triangulos irregulares geradas no software Pix4d (a) área um (b) área dois (c) área três.



Fonte: Autor

Figura 34 - Erros de projeção na malha de triângulos irregulares.



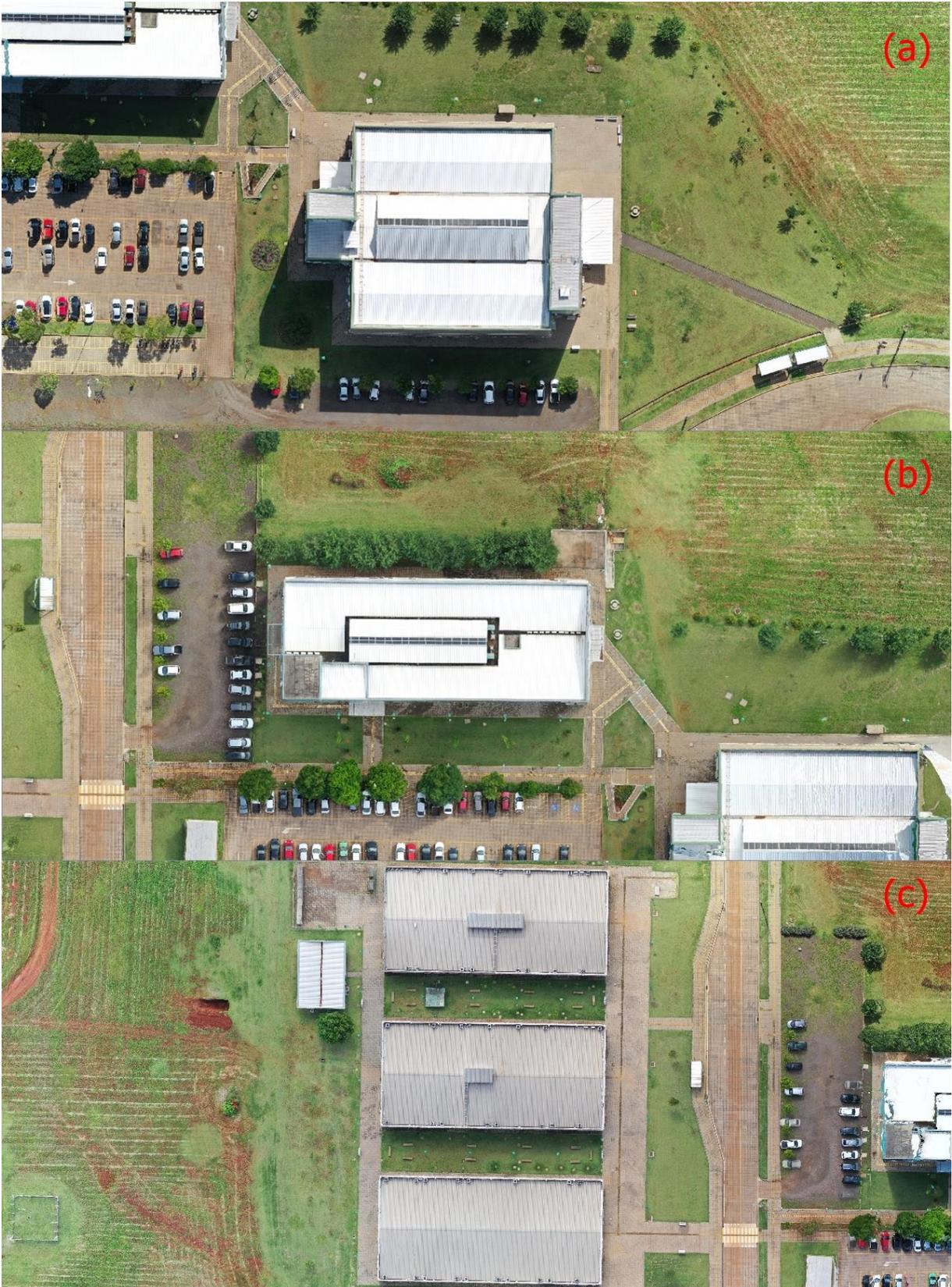
Fonte: Autor

4.1.4 Ortomosaico

Ortomosaicos podem ser usados para levantamentos simples de dimensões de edifícios com uso eficiente de recursos econômicos e temporais, evitando o uso de equipamentos caros de nível de levantamento. (KOC et al., [s.d.]

Em nosso estudo, conseguimos verificar com alto nível de detalhamento as feições das coberturas analisadas, podendo assim identificar regiões mais adequadas para instalação de painéis solares. Os ortomosaicos gerados para as áreas um, dois e três, conforme a **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, obtiveram um tamanho de píxel de 2,02 cm, 1,97 cm e 2 cm respectivamente.

Figura 35 - Ortomosaicos gerados no software Pix4d (a) área um (b) área dois (c) área três.



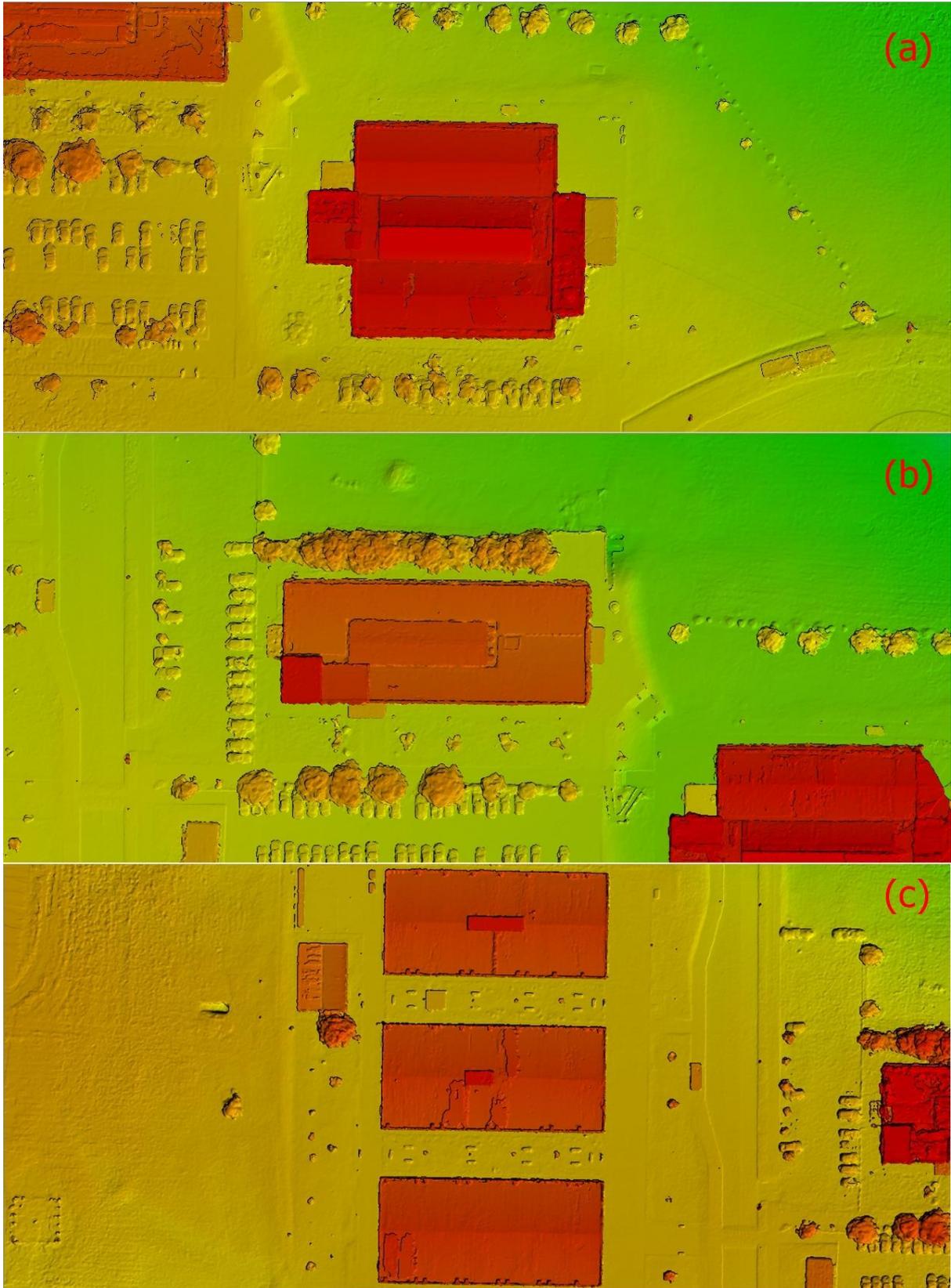
Fonte: Autor

4.1.5 Modelo Digital de Superfície

Existem várias etapas críticas para estimar o potencial solar em qualquer paisagem, construída ou natural. Primeiro, os modelos solares requerem uma representação digital das características em toda a área de estudo. Isso pode incluir Modelos Digitais de Superfície (MDS), representações 3D de estruturas ou uma combinação de ambos. Os MDS's são a representação mais comumente usada porque pode-se aproveitá-los para obter informações adicionais, incluindo inclinação e aspecto. Quando combinadas, essas informações são injetadas em modelos solares para determinar o nível de radiação solar incidente em toda a região de estudo. (NELSON; GRUBESIC, 2020)

Na Figura 36, estão representados os Modelos Digitais de Superfície para as áreas de interesse, eles serviram de base para a modelagem da irradiação solar nas coberturas dos edifícios na próxima etapa de processamento no software QGIS.

Figura 36 - Modelos Digitais de Superfície gerados no software Pix4d (a) área um (b) área dois (c) área três



Fonte: Autor

4.2 RESULTADOS DO PROCESSAMENTO NO SOFTWARE QGIS

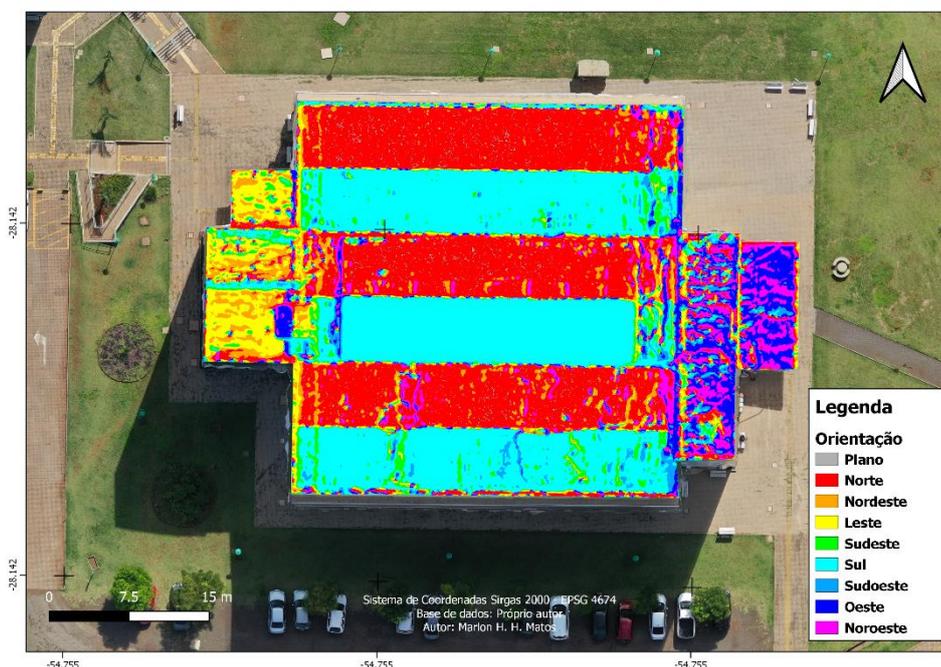
Com os Modelos Digitais de Superfície gerados, podemos dar sequência a próxima etapa que corresponde a elaboração dos mapas de aspecto, declividade e irradiação solar nas áreas de interesse.

4.2.1 Mapas de Aspecto

Um mapa de aspecto é gerado a partir do raster de elevação. Aspecto é a direção da bússola que um declive enfrenta. Os pixels terão um valor de 0-360° medido em graus a partir do Norte, indicando o azimute. No hemisfério norte, o lado norte das encostas é frequentemente sombreado, enquanto o lado sul recebe mais radiação solar. (QGIS, 2022)

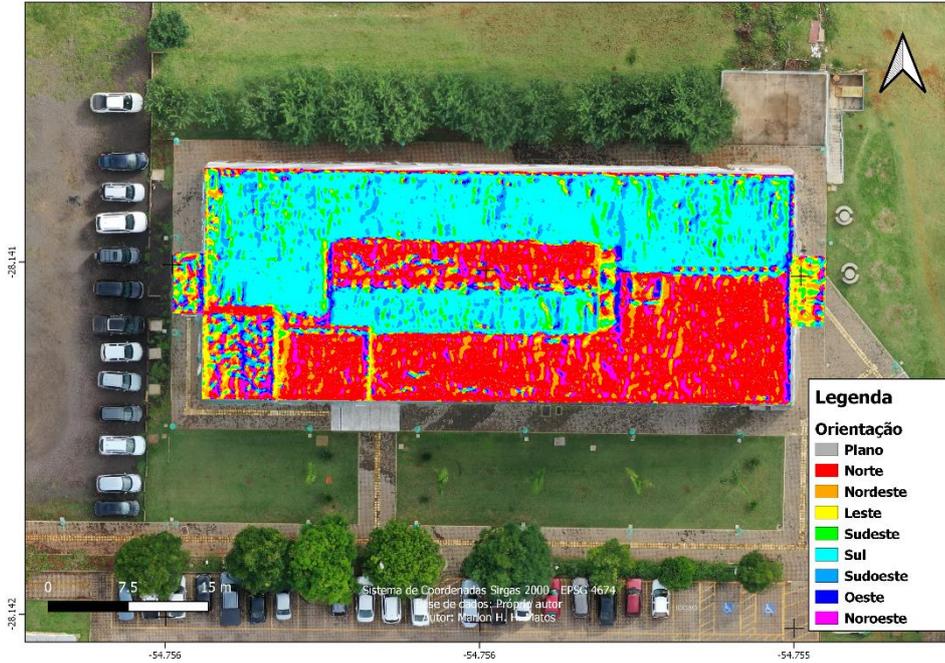
As *Figura 37*, *Figura 38* e *Figura 39*, correspondem aos mapas de aspecto das áreas de interesse. Na sequência as *Figura 40* e *Figura 41* trazem os gráficos de área e porcentagem total da distribuição do aspecto. Podemos verificar que os telhados inclinados para as regiões norte e sul ocupam uma maior área nas coberturas, com 30% cada, as demais orientações variam entre 5% e 8%.

Figura 37 - Mapa de aspecto da área um



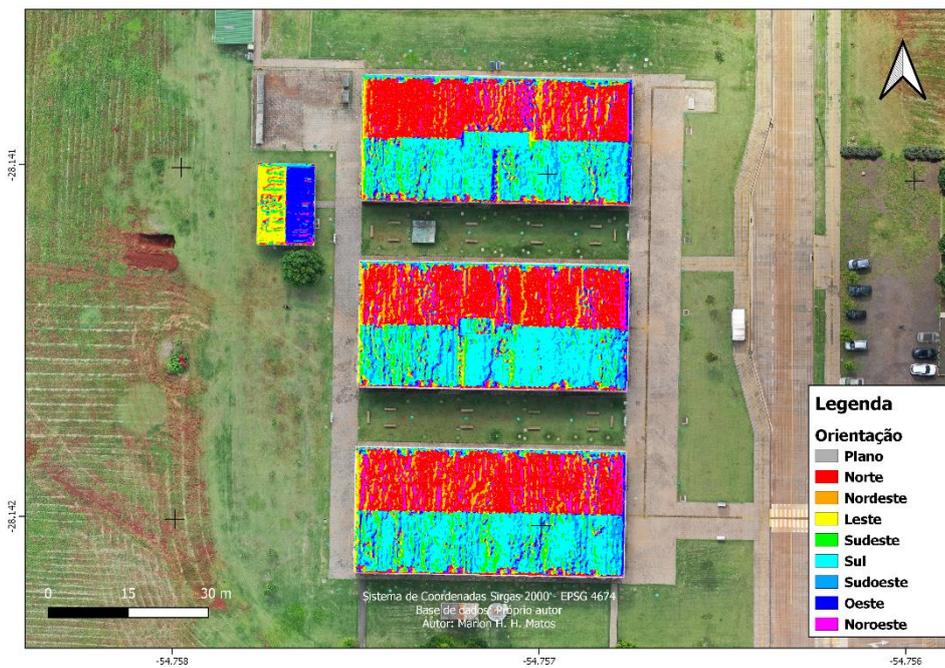
Fonte: Autor

Figura 38 - Mapa de aspecto da área dois

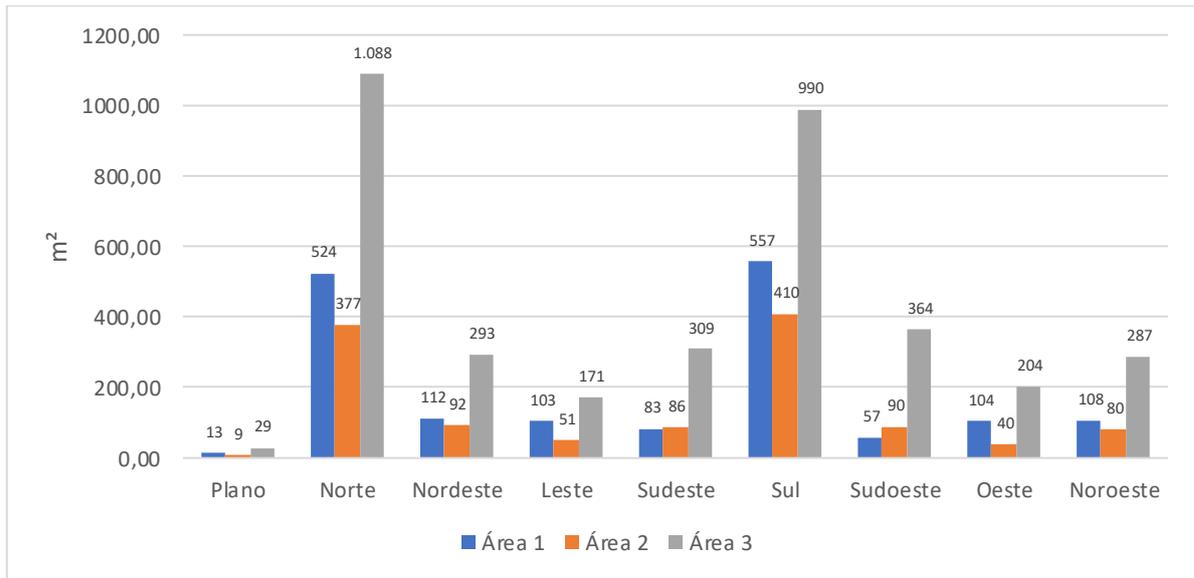


Fonte: Autor

Figura 39 - Mapa de aspecto da área três

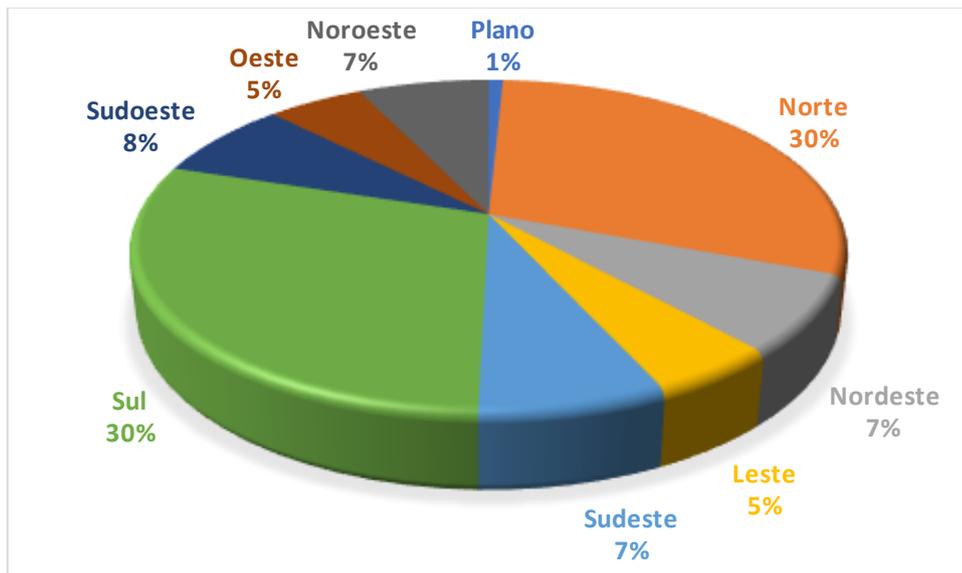


Fonte: Autor

Figura 40 - Distribuição do aspecto nas áreas de interesse (m²)

Fonte: Autor

Figura 41 - Distribuição do aspecto nas áreas de interesse (%)



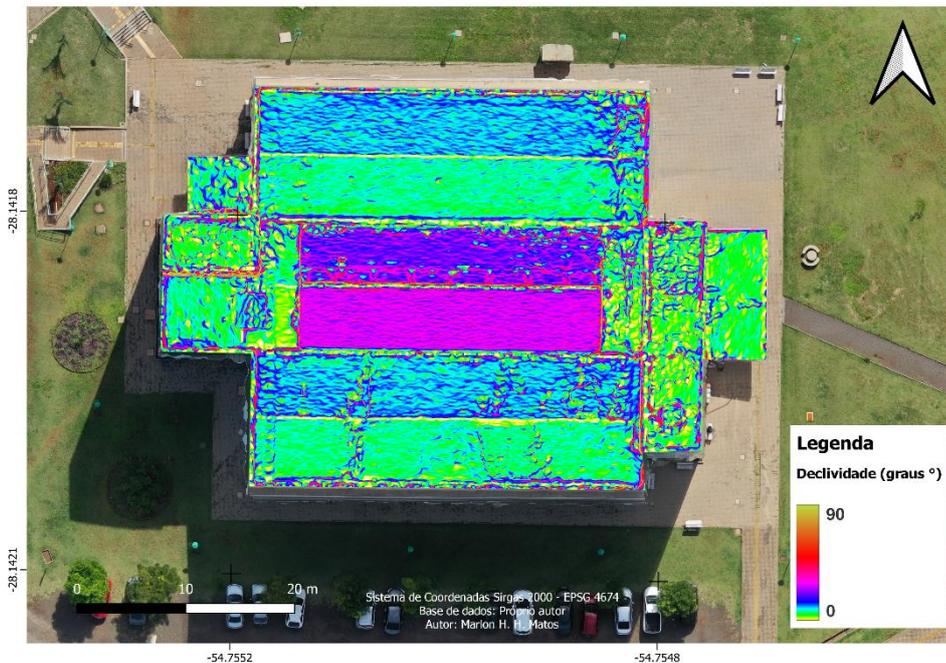
Fonte: Autor

4.2.2 Mapas de declividade

As Figura 42, Figura 43 e Figura 44, representam os mapas de declividade das três áreas analisadas. Jurinic (2020), através de um estudo realizado na UFFS – Campus Cerro Largo, determinou que 28° seria o ângulo médio com maior incidência de irradiação solar.

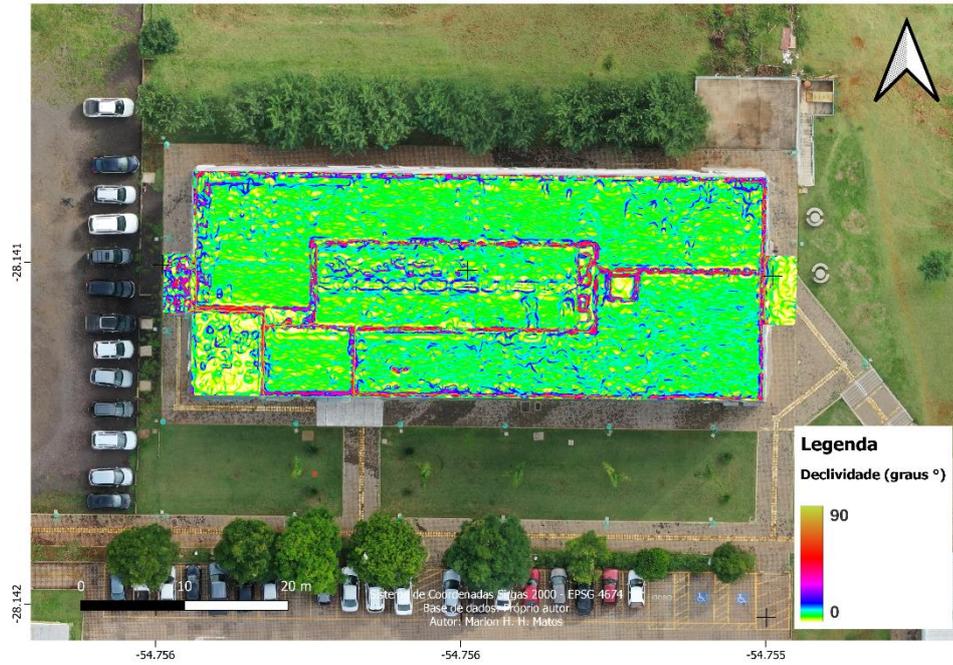
A declividade média da área um foi de 14.75° , enquanto das áreas dois e três ficaram em 9.83° e 7.55° , respectivamente.

Figura 42 - Mapa de declividade da área de estudo um



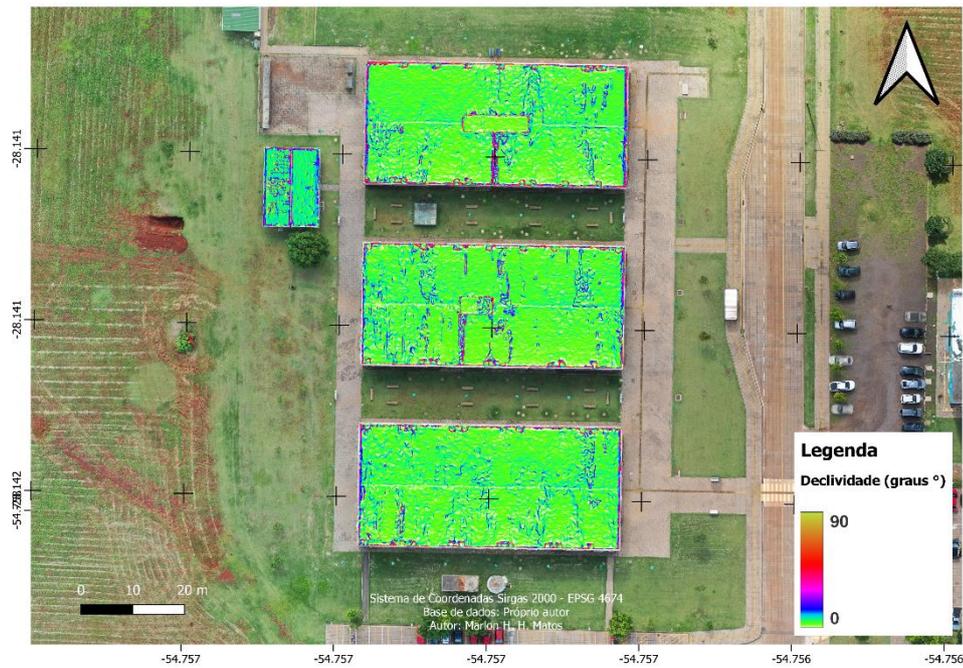
Fonte: Autor

Figura 43 - Mapa de declividade da área de estudo dois



Fonte: Autor

Figura 44 - Mapa de declividade da área de estudo três



Fonte: Autor

4.2.3 Irradiação Solar

A partir da geração dos dados de aspecto e declividade, foi possível calcular a irradiação solar nas áreas de interesse, a ferramenta r.sun, presente no software QGIS, permite a escolha do dia do ano que se pretende modelar, no nosso caso escolhemos os solstícios de verão e inverno, no hemisfério Sul, por se tratar dos dias do ano em que a inclinação na Terra faz com que tenhamos os períodos diários de insolação mais longo e curto, respectivamente.

Nas Figura 45 e Figura 46, estão os resultados da irradiações para a cobertura da área um, no solstício de inverno os valores variam entre 336 e 6.958 Wh/m².dia e a média fica em 3.395 Wh/m².dia. Já para o verão a variação fica entre 575 e 9.466 Wh/m².dia, com média de 8.607 Wh/m².dia.

Figura 47 e Figura 48 nos trazem os dados de irradiação solar para a cobertura da área dois, onde obteve-se variação entre 337 e 6.616 Wh/m².dia no solstício de inverno e 577 e 9.464 Wh/m².dia no solstício de verão, com médias de 3.617 e 8.884, respectivamente.

Já nas Figura 49 e Figura 50 temos os valores para as coberturas da área três, valores esses que variam entre 338 e 6.956 Wh/m².dia no solstício de inverno e 578 e 9.465 Wh/m².dia no solstício de verão e suas médias ficam em 3.595 e 9.108 Wh/m².dia, respectivamente.

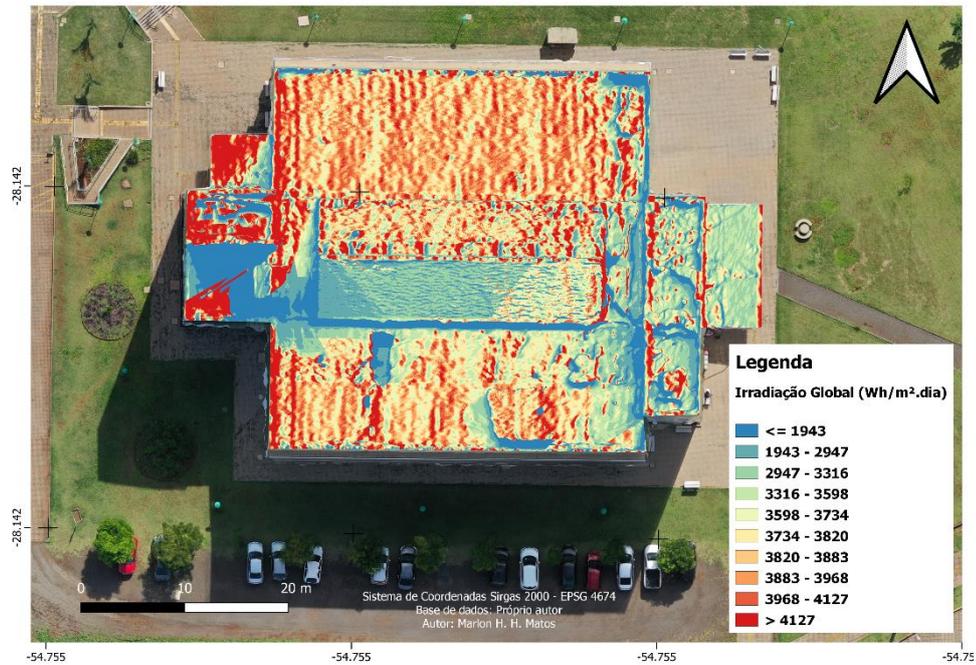
Sabendo que as áreas das coberturas edifícios correspondem a 1661 m² para a área um, 1235m² e 3.735m² para as áreas dois e três, respectivamente. Podemos estimar a irradiação total nas coberturas para as datas escolhidas através do valor médio calculado, conforme Tabela 5.

Tabela 5 - Irradiação total nas coberturas para os solstícios de inverno e verão

	Área 1	Área 2	Área 3
Área total (m²)	1661	1235	3735
Irradiação total solstício de inverno (KWh.dia)	5639	4467	13427
Irradiação total solstício de verão (KWh.dia)	14296	10972	34018

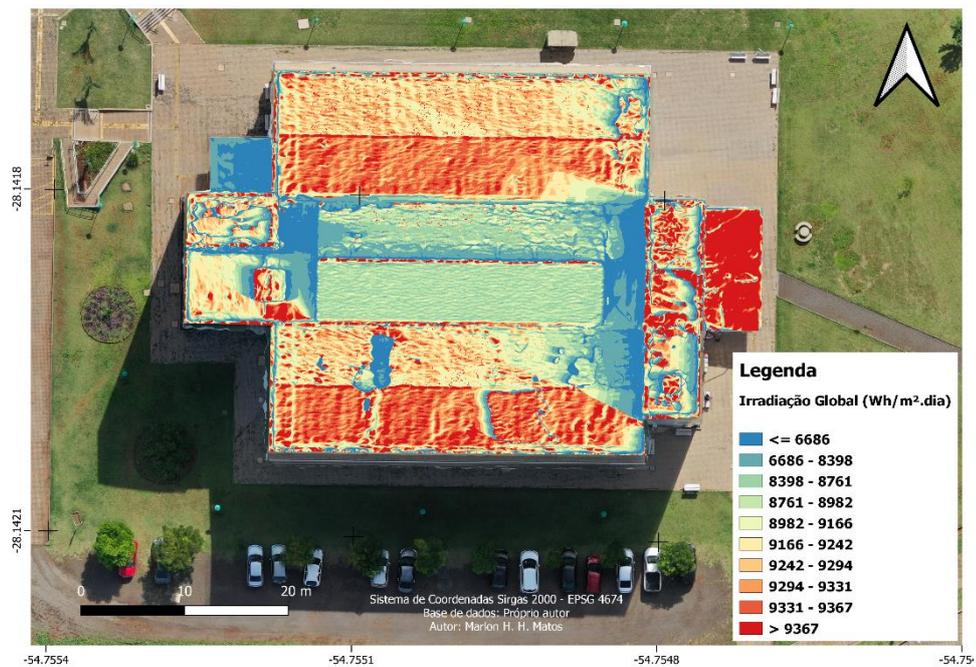
Fonte: Autor

Figura 45 - Mapa de Irradiação da área um no solstício de inverno



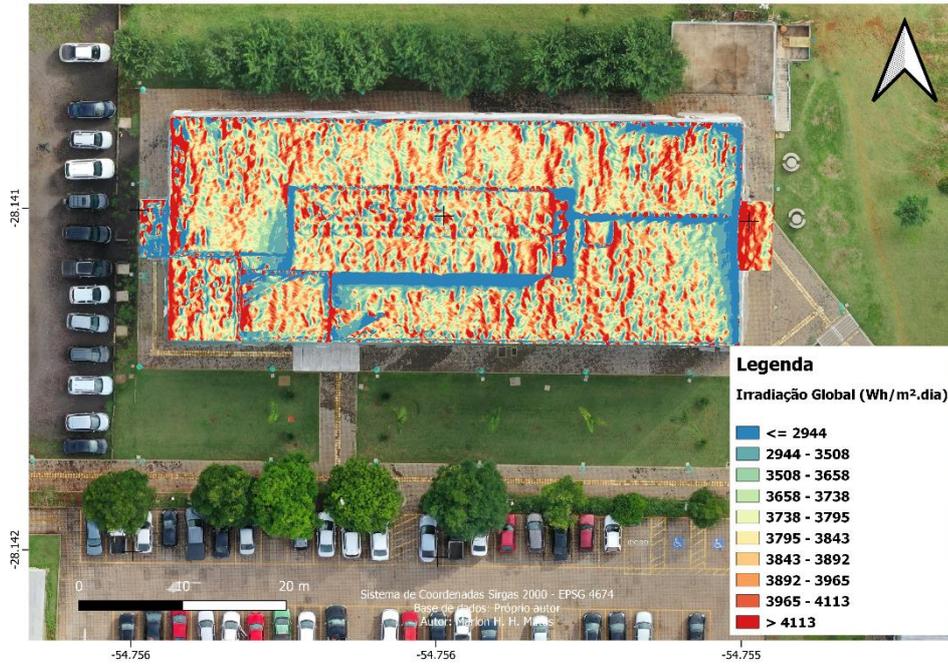
Fonte: Autor

Figura 46 - Mapa de Irradiação da área um no solstício de verão



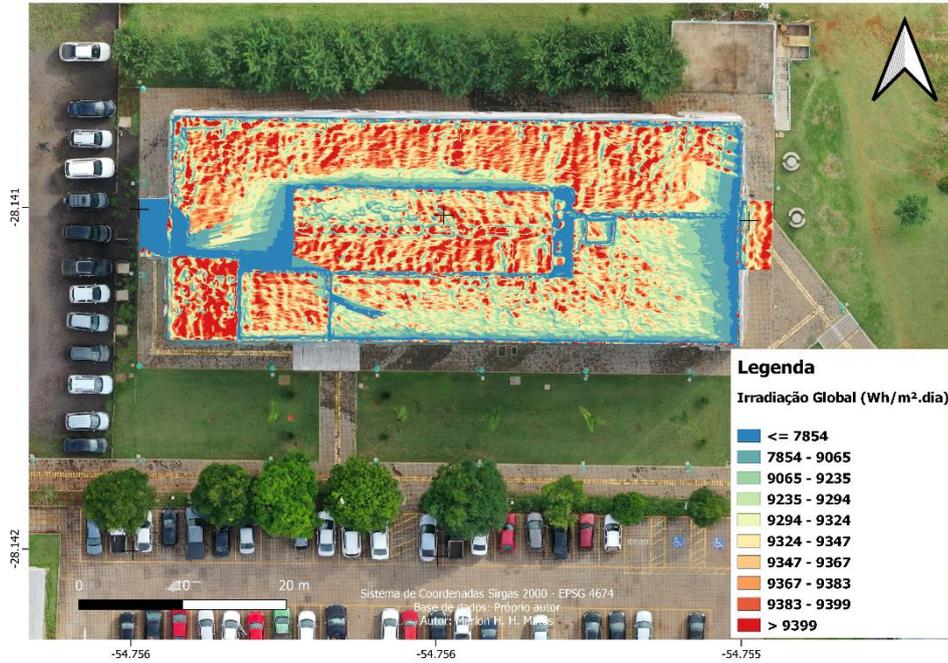
Fonte: Autor

Figura 47 - Mapa de Irradiação da área dois no solstício de inverno



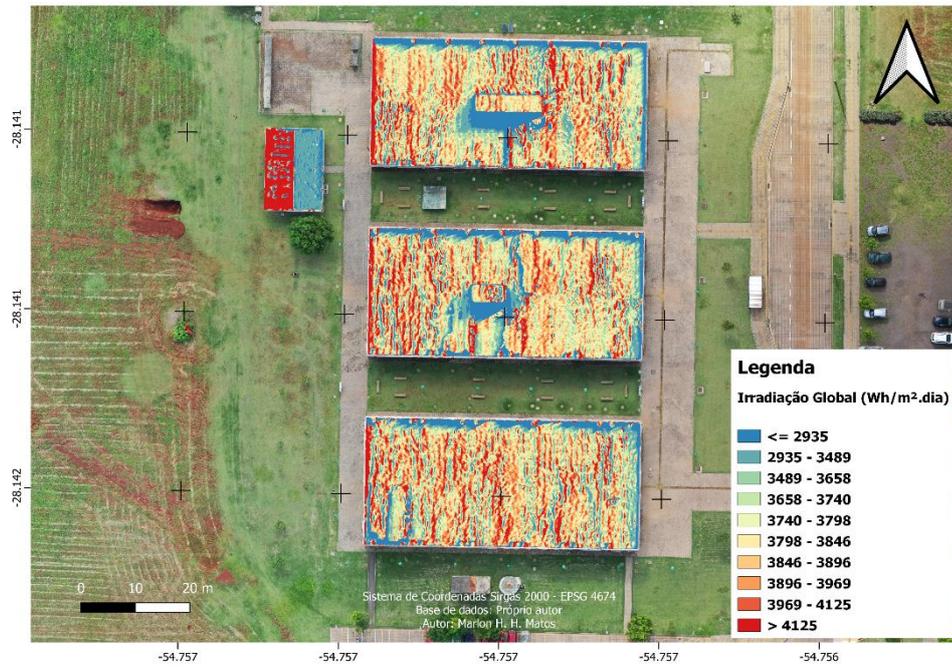
Fonte: Autor

Figura 48 - Mapa de Irradiação da área dois no solstício de verão



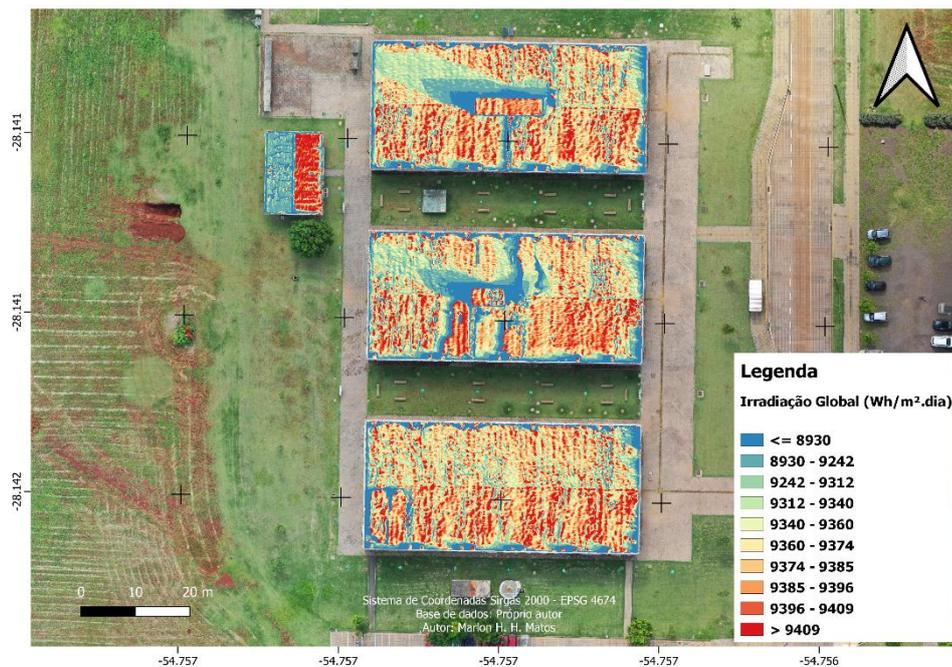
Fonte: Autor

Figura 49 - Mapa de Irradiação da área três no solstício de inverno



Fonte: Autor

Figura 50 - Mapa de Irradiação da área três no solstício de verão



Fonte: Autor

Podemos comparar os resultados encontrados com os dados disponíveis nas estações meteorológicas próximas da nossa área de interesse. O campus Cerro Largo da UFFS possui uma estação meteorológica automática IRIOGRAN38, em operação desde novembro de 2015. Além disso, consultando o mapa de localização das estações no site do INMET, foi verificado a presença de duas que possuíam dados de irradiação solar, a estação automática A810, na cidade de Santa Rosa - RS, distante cerca de 39km, e a estação convencional 83907 no município de São Luiz Gonzaga – RS, que fica a cerca de 36km.

Para uma melhor análise, foram levantados os dados dos últimos dez anos para os solstícios de inverno e verão das estações, na Tabela 6 são exibidos os valores informados. Obteve-se na estação A810 uma média de 5.819 Wh/m².dia nos solstícios de verão e 2.453 Wh/m².dia nos solstícios de inverno. A estação 83907 apresentou médias de 6.572 Wh/m².dia e 2.088 Wh/m².dia para os solstícios de verão e inverno, respectivamente. Já a estação IRIOGRAN38, demonstrou médias de 5.824 Wh/m².dia, para o solstício de verão e 2.364 Wh/m².dia, para o de inverno.

Tabela 6 - Série histórica dos últimos dez anos dos dados de irradiação solar nas estações A810, 83907 e IRIOGRAN38

Ano	Santa Rosa (A810)		São Luiz Gonzaga (83907)		Cerro Largo (IRIOGRAN38)	
	Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno
2021	8498	1107	8796	1067	8109	799
2020	9262	3272	9638	3490	8500	3446
2019	4545	3236	5711	3883	4655	3083
2018	661	2142	3003	768	2776	2374
2017	7332	3619	8551	3917	6686	3418
2016	8377	-	8627	-	7745	1065
2015	2340	-	2424	1300	2299	-
2014	2033	3073	1203	-	-	-
2013	7402	-	9154	831	-	-
2012	7740	722	8614	1450	-	-
Média	5819	2453	6572	2088	5824	2364

Fonte: Inmet (2022) e Wunderground (2022)

A Tabela 7 nos mostra a comparação entre os valores médios medidos nas estações meteorológicas e os estimados no modelo r.sun presente no software QGIS para as coberturas das áreas um, dois e três.

Tabela 7 - Comparação dos valores medidos e estimados

Dia	Valores médios medidos (Wh/m ² .dia)			Valores médios estimados (Wh/m ² .dia)		
	A810	83907	IRIOGRAN38	área 1	área 2	área 3
Solstício de inverno	2453	2088	2364	3395	3617	3595
Solstício de verão	5819	6572	5824	8607	8884	9108

Fonte: Autor

As Figuras Figura 51 e Figura 52 nos mostram que os valores obtidos através do modelo podem ser superestimados em relação as médias observadas nas estações meteorológicas. Isso se deve ao fato de o modelo considerar apenas céu livre de nebulosidade para calcular os resultados. A diferença dos valores estimados no solstício de inverno varia entre 38% e 47% para os dados da estação A810, entre 63% e 73% na estação 83907 e entre 44% e 53% na estação IRIGRAN38. Já para o solstício de verão as diferenças ficam entre 48% e 57% na estação A810, 31% e 39% na estação 83907 e 48% e 56% na estação IRIGRAN38.

Os resultados obtidos se aproximam dos valores medidos para dias de céu claro. Para a determinação de um modelo que se aproxime da realidade, deve-se levar em consideração a nebulosidade do local, para tal é determinada um Coeficiente de Céu Claro (Kc), mesmo sendo um fator difícil de modelar (FEITOSA,2022).

Feitosa (2022) ainda afirma que existem três possíveis métodos para determinar o Kc:

- (a) utilizar dados existentes de radiação solar em condições de céu claro e de céu nublado (ou céu real), sendo o Kc a razão entre a primeira pela segunda, representada pela equação:

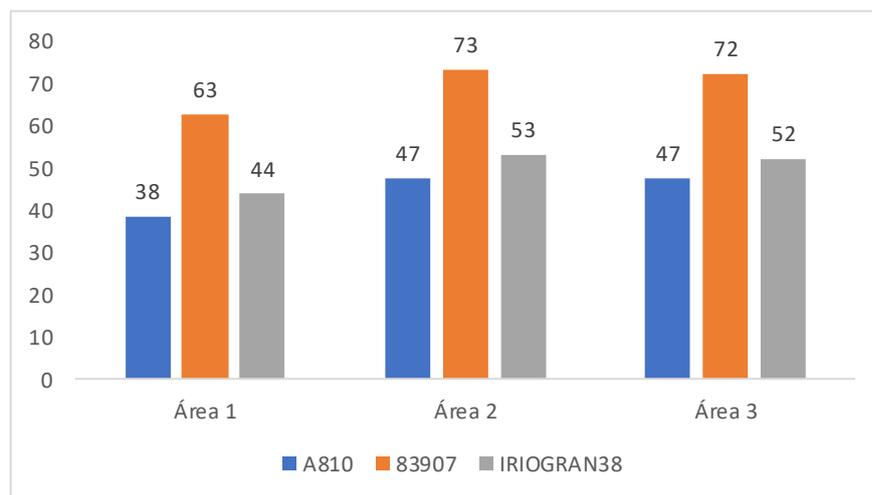
$$KC = \frac{\text{Radiação(céu claro)}}{\text{Radiação(céu nublado)}}$$

(b) aplicar regressão linear;

(c) fazer a derivação indireta do Kc a partir do índice de cobertura de nuvens informado nas imagens de satélites;

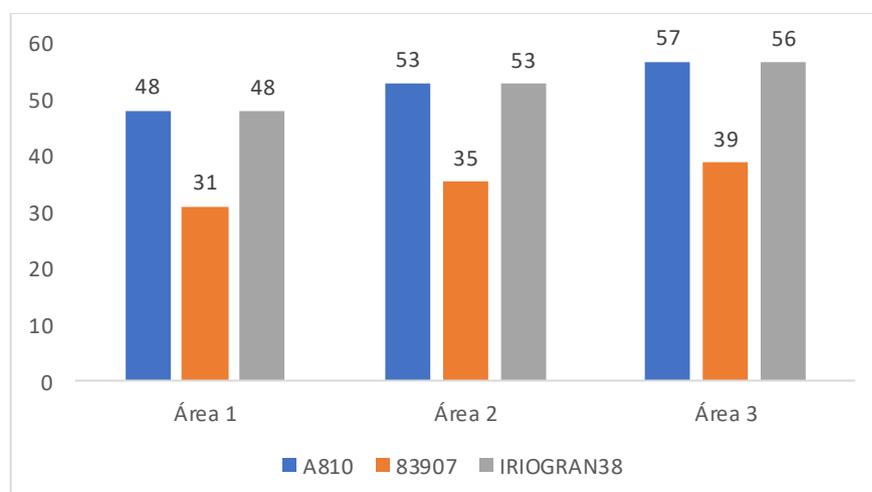
No presente trabalho realizado o cálculo do índice KC, o qual pode ser determinado em trabalhos futuros.

Figura 51 - Diferença dos valores medidos e estimados para o solstício de inverno (%)



Fonte: Autor

Figura 52 - Diferença dos valores medidos e estimados para o solstício de verão (%)



Fonte: Autor

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho procurou demonstrar a aplicação do levantamento de aerofotogramétrico com drone para coleta de dados de coberturas de edifícios e a estimativa de irradiação solar.

Observou-se que o levantamento deve ser feito em condições meteorológicas e planejamento ideais para evitar erros nas próximas etapas do processo. O processamento dos dados coletados usando o software PIX4D se mostrou eficiente embora a reconstrução dos Modelos Digitais de Superfície apresentaram algumas falhas recorrente das etapas anteriores de limpeza de outliers, problemas esses que não comprometeram o resultado final.

Os Ortomosaicos e Modelos Digitais de Superfície apresentaram tamanho de pixel próximos a 2 cm, no caso do ortomosaico isso nos permite analisar com um alto nível de detalhamento as informações todos os elementos presentes nas coberturas dos edifícios. Já para os MDS's essa riqueza de detalhes pode acarretar num volume de dados muito grande, quando analisadas áreas extensas, ocasionando morosidade no processamento, muitas vezes inviabilizando o projeto.

A estimativa de irradiação solar realizada através da ferramenta r.sun presente no software QGIS se mostrou eficiente para modelagem de irradiação em dias de céu claro, caso a intenção do projeto seja planejar a instalação de painéis solares, deve-se adicionar ao modelo um índice que considere a nebulosidade da região.

Para trabalhos futuros recomenda-se avaliar uma amostra maior de dias durante o ano e a partir dos dados gerados, adicionar o índice de nebulosidade, simular a implementação de células fotovoltaicas nas áreas de interesse, verificar locais mais adequados para instalação e estimar o retorno de investimento da possível usina de geração.

REFERÊNCIAS

- AGOSTINHO; S. (2012). **Inspeção e Monitorização de Estruturas em Engenharia Civil - Utilização de UAV na Inspeção e Monitorização**. Disponível em: <<https://digituma.uma.pt/handle/10400.13/570>> Acesso em: 5 jun 2022.
- AGUGIARO G. et al. **Solar radiation estimation on building roofs and web-based solar cadastre**. Disponível em: <<https://www.isprs-ann-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/I-2/177/2012/isprsnals-I-2-177-2012.pdf>> Acesso em: 05 jan. 2022.
- ALSUHLI, G.; FAHIM, A.; GADALLAH, Y. **A survey on the role of UAVs in the communication process: A technological perspective**. Computer Communications, 14 jul. 2022.
- ARONOFF, S. **Geographic Information Systems: a management perspective**. Ottawa: WDL Publications, 1989.
- BALAGUER, D. A.; ALVES, R. M. **Análise multicritério e uso de SIG para projetos com uso de energia solar fotovoltaica: um estudo bibliométrico**. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GESTÃO E ENGENHARIA URBANA, 3., 2021.
- BOWKER, David E; DAVIS; Richard E. **Spectral Reflectances of Natural Targets for Use in Remote Sensing Studies**. Disponível em:<<https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19850022138/downloads/19850022138.pdf>>. Acesso em: 15 mar. 2022.
- CAVALCANTE, Rodrigo. **Apostila de Introdução ao SIG**. Disponível em: <<https://www.ufmg.br/proplan/wp-content/uploads/Apostila-de-Introdu%C3%A7%C3%A3o-ao-SIG-Proplan-2015.pdf>> Acesso em: 2 jun 2022.
- CHIABRANDO, Filiberto et al. **3D roof model generation and analysis supporting solar system positioning**. Disponível em: <<https://cdnsiencepub.com/doi/abs/10.5623/cig2017-301>> Acesso em: 02 jan. 2022.
- CLIMATE-DATA. **Clima Cerro Largo**. Disponível em: <<https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/rio-grande-do-sul/cerro-largo-43782/>> Acesso em: 07 jan. 2022.
- COELHO, Luiz; BRITO, Jorge Nunes. **Fotogrametria digital**. Rio de Janeiro: EdUERJ, 2007. 196 p.
- DECEA. **Aeronaves não tripuladas e o acesso ao espaço aéreo brasileiro**. Disponível em: <<https://publicacoes.decea.mil.br/publicacao/ica-100-40>>. Acesso em 05 jan. 2021.
- DJI. **Mavic 2**. Disponível em: <https://www.dji.com/br/mavic-2?site=brandsite&from=insite_search> Acesso em: 12 jun. 2022.

ELLABBAN, O.; ABU-RUB, H.; BLAABJERG, F. **Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 39, p. 748–764, nov. 2014.

EPE. **Anuário estatístico de energia elétrica 2022**. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/Fact%20Sheet%20-%20Anu%C3%A1rio%20Estat%C3%ADstico%20de%20Energia%20El%C3%A9trica%202022.pdf>> Acesso em 18 fev. 2022.

EPE. **Bem 2022**. Relatório Síntese. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-631/BEN_S%C3%ADntese_2022_PT.pdf> Acesso: 19 fev. 2022.

EPE. **Matriz energética e elétrica**. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica#ELETRICA>>. Acesso em 10 jan. 2022.

FEITOSA, Rodrigus Oliveira. **Geoinformática aplicada na estimativa do potencial fotovoltaico do semiárido sergipano**. Disponível em: <https://ri.ufs.br/bitstream/riufs/15420/2/RODRIGUS_OLIVEIRA_FEITOSA.pdf>. Acesso em: 01 set. 2022.

FERNANDES, Telma Marlene Ferreira. **Metodologias de aquisição de dados para o cálculo da radiação solar - o aproveitamento da energia fotovoltaica no parque industrial de Lustosa**. Disponível em: <<https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/81716>>. Acesso em: 15 jun 2022.

FERREIRA, Alexandre Moreno Richwin. **Avaliação de câmara de pequeno formato transportada por veículo aéreo não tripulado – VANT, para uso em aerolevantamentos**. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/bitstream/10482/17305/1/2014_AlexandreMorenoRichwinFerreira.pdf> Acesso em: 8 jun. 2022.

FREITAS, S. et al. **Modelling solar potential in the urban environment: State-of-the-art review**. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032114007461>> Acesso em: 04 jan. 2022.

FUENTES, Jose Eduardo; MOYA, Francisco David; MONTOYA, Oscar Danilo; **Method for Estimating Solar Energy Potential Based on Photogrammetry from Unmanned Aerial Vehicles**. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2079-9292/9/12/2144?type=check_update&version=1> Acesso em: 02 jan. 2022.

GRASS GIS. **Reference Manual**. Disponível em: <<https://grass.osgeo.org/grass82/manuals/r.sun.html>> Acesso em: 15 jun 2022.

GE, L.; FENG, J. **Out-of-core outlier removal for large-scale indoor point clouds**. *Graphical Models*, v. 122, p. 101142, 1 jul. 2022.

HALDAR, S. K. Photogeology, **Remote Sensing and Geographic Information System in Mineral Exploration**. *Mineral Exploration*, p. 95–115, 2013.

Hofierka, J.; Suri, M. **The solar radiation model for Open source GIS: implementation and applications**. International GRASS users conference in Trento, Italy, September 2002.

HOFIERKA, J.; GALLAY, M.; ONAČILLOVÁ, K. Physically-based land surface temperature modeling in urban areas using a 3-D city model and multispectral satellite data. **Urban Climate**, v. 31, p. 100566, 1 mar. 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo Brasileiro de 2010**. Rio de Janeiro: IBGE, 2012.

KODYSH, Jeffrey B. et al. **Methodology for estimating solar potential on multiple building rooftops for photovoltaic systems**. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2210670713000036>> Acesso em: 04 jan. 2022.

KOC, A. B. et al. **Estimating Rooftop Areas of Poultry Houses Using UAV and Satellite Images**. [s.d.].

KUMAR JAISWAL, K. et al. **Renewable and sustainable clean energy development and impact on social, economic, and environmental health**. *Energy Nexus*, p. 100118, 9 jul. 2022.

LEITE, Ana Carolina Gomes Moreira. **A sustentabilidade empresarial, social e as fontes de energia**. Disponível em: <<https://www.pucsp.br/sites/default/files/download/posgraduacao/programas/administracao/bisus/bisus-2s-2103-v1.pdf>> Acesso em: 9 abr. 2022.

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

MACHETE, Rita Freire. **Utilização de Modelos SIG-3D na Determinação da Radiação Solar Incidente nos Edifícios**. Disponível em: <<https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/cursos/ma/dissertacao/846778572210653>> Acesso em: 9 abr. 2022.

MEKURIA, R.; LI, Z.; TULVAN, C. **Evaluation criteria for PCC (Point Cloud Compression)**. MPEG2016 n16332, Geneva, February 2016.

NELSON, J. R.; GRUBESIC, T. H. **The use of LiDAR versus unmanned aerial systems (UAS) to assess rooftop solar energy potential**. *Sustainable Cities and Society*, v. 61, p. 102353, 1 out. 2020.

OLIVEIRA, Cêurio de. **Dicionário Cartográfico**. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv66318.pdf>> Acesso em: 1 jun 2022.

OLIVEIRA, Raquel Alves de; TOMMASELLI; Antônio Maria Garcia. **Avaliação de uma técnica para geração de modelos digitais de superfície utilizando múltiplas imagens**. Boletim de Ciências Geodésicas [online]. 2014, v. 20, n. 2 [Acessado 24 Julho 2022] , pp. 257-278. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1982-21702014000200016>>. Epub 13 Jun 2014. ISSN 1982-2170. <https://doi.org/10.1590/S1982-21702014000200016>.

PALERMO, Rodrigo de Avila; LEITE; Taís Correia. **Integração de levantamento fotogramétrico aéreo com o uso de vant e levantamento fotogramétrico terrestre para o mapeamento tridimensional das ruínas de São Miguel das Missões**. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/77752/000895557.pdf?sequence=1&isAllowed=y>> Acesso em: 1 jun 2022.

PEREIRA, Enio Bueno. et al. **Atlas brasileiro de energia solar**. Disponível em: <<http://mtc-m21b.sid.inpe.br/rep/8JMKD3MGP3W34P/3PERDJE>> Acesso em: 8 abr 2022.

PINA, Maria De Fátima de; SANTOS, Simone M. **Conceitos básicos de Sistemas de Informação Geográfica e Cartografia aplicados à saúde**. Brasília: OPAS, 2000. 121 p.

PINHO, João T.; GALDINO, Marco A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. CRESESB. 2014.

PIX4D. **How to add / import and mark manual tie points (MTPs) in the rayCloud**. Disponível em: <<https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202560349-How-to-add-import-and-mark-manual-tie-points-MTPs-in-the-rayCloud>> Acesso em: 10 jun.2022

PREFEITURA DE CERRO LARGO. **Dados Gerais**. Disponível em: <<https://www.cerrolargo.rs.gov.br/site/conteudos/2040-dados-gerais>> Acesso em: 29 abr. 2022.

ROBINSON, A. H. **Elements of cartography**. 2. ed. New York, NY: John Wiley, 1963. 343 p.

ROSA, Roberto. **Introdução ao geoprocessamento**. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5551878/mod_resource/content/2/Apostila_Geop_rrosa.pdf>. Acesso em: 19 fev. 2022

SOUZA, Muriele Bester de. Et al. **Modelos para estimativa da radiação difusa a partir da radiação global horizontal para a cidade de Curitiba/PR**. Disponível em: <<https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/749>> Acesso em: 1 jun 2022.

SCHÖNBERGER, J. L; FRAHM, J. **Structure-from-Motion Revisited**, 2016 *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2016, pp. 4104-4113, doi: 10.1109/CVPR.2016.445.

TEVES, Justine et al. **Solar energy resource assessment using r.sun module in grass gis and synthetic aperture radar (sar) dem in the Zamboanga Peninsula (region 9), Philippines**. Disponível em: <<https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.740.8741&rep=rep1&type=pdf>> Acesso em: 15 set. 2022.

TOMMASELLI, Antonio M. G. **Fotogrametria Basica**. 1. ed. [S.l.: s.n.], 2009. cap. 1, p. 1-2. v. 1. Disponível em: <http://www.faed.udesc.br/arquivos/id_submenu/891/introducao_a_fotogrametria.pdf>. Acesso em: 27 maio 2022.

WUNDERGROUND. **UFFS - Campus Cerro Largo - IRIOGRAN38**. Disponível em: <<https://www.wunderground.com/dashboard/pws/IRIOGRAN38/table/2018-06-21/2018-06-21/daily>> Acesso em: 15 set. 2022.

ZHANG, Wen; et al. **Evaluation of the photovoltaic potential in built environment using spatial data captured by unmanned aerial vehicles**. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/ese3.408>> Acesso em: 07 jan. 2022.

ZHOU, Qiming. **Digital Elevation Model and Digital Surface Model**. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9781118786352.wbieg0768>> Acesso em: 9 jan. 2022.

ANEXO A – Registro Sisant

	REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL FEDERATIVE REPUBLIC OF BRAZIL	
	AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL NATIONAL CIVIL AVIATION AGENCY	

CERTIDÃO DE CADASTRO DE AERONAVE NÃO TRIPULADA – USO NÃO RECREATIVO UNMANNED AIRCRAFT INSCRIPTION CERTIFICATE – NON-RECREATIONAL	
<p>Esta certidão de cadastro, emitida de acordo com o RBAC-E nº 94, é válida até 14/08/2022, salvo em caso de cancelamento, suspensão ou revogação pela Autoridade de Aviação Civil Brasileira.</p> <p><i>This Inscription Certificate, issued in accordance with RBAC-E nr. 94, shall remain valid until 08/14/2022, unless it is cancelled, suspended or revoked by the Brazilian Civil Aviation Authority.</i></p> <p>Operador (Operator) Marlon Henrique Hetzel Matos</p> <p>CPF (document): </p>	<p>Nº do cadastro (Inscription Number): PP-999986427</p> <p>Uso (Purpose): não recreativo (non-recreational) Ramo de atividade (Business): Aerofotografia Fabricante (Maker): DJI Modelo (Model): Mavic 2 Pro Nº de série (Serial Number): 163cgcgr0a6k7j Peso máximo de decolagem (MTOW): 0,91 kg Foto (Picture):</p> <div style="text-align: center;">  </div>
<p>O descumprimento da regulamentação aplicável pode ensejar consequências administrativas, civis e/ou criminais para o infrator.</p>	<p>Informações adicionais (additional information):</p>
<p>O detentor desta certidão de cadastro (o operador), ou aquele com quem for compartilhada sua aeronave, é considerado apto pela ANAC a realizar voos recreativos e não recreativos no Brasil, com a aeronave não tripulada acima identificada, em conformidade com os regulamentos aplicáveis da ANAC. É responsabilidade do operador tomar as providências necessárias para a operação segura da aeronave, assim como conhecer e cumprir os regulamentos do DECEA, da Anatel, e de outras autoridades competentes.</p> <p><i>The holder of this inscription certificate (the operator), or the person with whom this aircraft is shared, is considered apt by Brazilian Civil Aviation Authority to perform recreational and non-recreational flights in Brazil, using the above identified unmanned aircraft, in conformity with the applicable regulations of Brazilian Civil Aviation Authority. It's the operator's responsibility to take the necessary actions to ensure a safe operation, as well as know and comply with the regulations of air traffic control (ATC), telecommunications, and other competent authorities</i></p>	
<p>A validade desta certidão pode ser verificada pelo link https://sistemas.anac.gov.br/SISANT/Aeronave/ConsultarAeronave</p>	
<p>Local e data da emissão (Place and date of issue) Brasília, 29 de julho de 2022 Brasília, July 29th, 2022</p>	
<p>Esta certidão de cadastro não é válida para aeronaves não tripuladas acima de 25 kg de peso máximo de decolagem, ou em voos além da linha de visada visual (BVLOS) ou acima de 400 pés ou 120 metros acima do nível do solo (AGL). <i>This inscription certificate is not valid for unmanned aircraft of more than 25 kg maximum takeoff weight, or flying beyond visual line of sight (BVLOS) or over 400 feet or 120 meters above ground level (AGL).</i></p>	

ANEXO B – Solicitação de voo Sarpas



Departamento
de Controle do Espaço Aéreo
Comando da Aeronáutica



SOLICITAÇÃO DE VOO #B84F2A

APROVADO

Operação

- Solicitante: **Marlon Henrique Hetzel Matos**
- Perfil: **1 (Padrão / ICA 100-40)**
- Tipo/Regra: **VLOS/**

Localização

- Decolagem
Lat: **-28.142169231188063**
Lng: **-54.75561261177064**
- Destino
Lat: **-28.142169231188063**
Lng: **-54.75561261177064**
- Área: **500m**
- Altura: **130ft**

Janela de Operação

Data	Início	Fim
11.01.2021	11:40 UTC	17:00 UTC

Equipamento

- Nº SISANT: **PP-999986427**

Piloto

- Nome: **Marlon Henrique Hetzel Matos**
- Código: **MGSR**
- CPF: **018.***.***-40**

Data	Início	Fim
11.01.2021	11:40 UTC	17:00 UTC

Comunicações

- Código de Chamada: **RPA-MGSR-27**
- ATS: **NÃO SE APLICA**
- Piloto: **NÃO SE APLICA**

RPS (1)

RPS	Lat/Lng	Telefone
Marlon Henrique Hetzel Matos	-28.142169231188063, -54.75561261177064	(55) 99998- 6427

ANEXO C – Relatórios de Processamento das áreas um, dois e três

Quality Report



Generated with Pix4Denterprise version 4.4.12

! **Important:** Click on the different icons for:

- ?** Help to analyze the results in the Quality Report
- i** Additional information about the sections

💡 Click [here](#) for additional tips to analyze the Quality Report

Summary



Project	uffs_salas
Processed	2022-07-06 03:42:51
Camera Model Name(s)	L1D-20c_10.3_5472x3648 (RGB)
Average Ground Sampling Distance (GSD)	2.02 cm / 0.80 in
Area Covered	0.045 km ² / 4.5139 ha / 0.02 sq. mi. / 11.1598 acres
Time for Initial Processing (without report)	01h:20m:31s

Quality Check



? Images	median of 53059 keypoints per image	✔
? Dataset	93 out of 93 images calibrated (100%), all images enabled	✔
? Camera Optimization	2.84% relative difference between initial and optimized internal camera parameters	✔
? Matching	median of 29054 matches per calibrated image	✔
? Georeferencing	yes, no 3D GCP	⚠

Preview

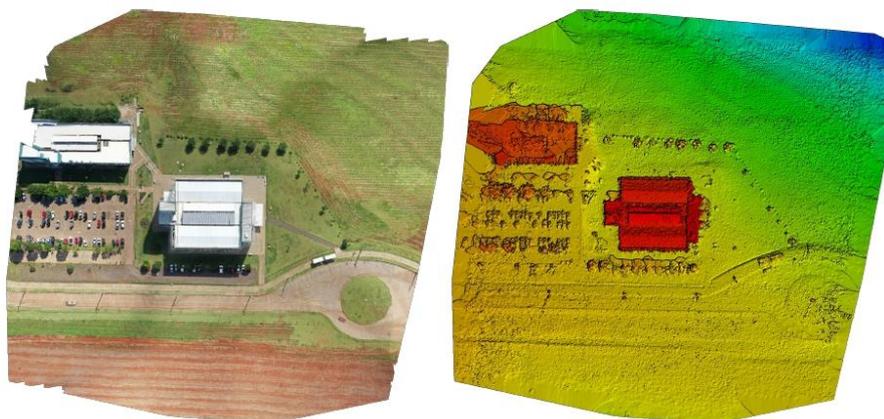


Figure 1: Orthomosaic and the corresponding sparse Digital Surface Model (DSM) before densification.

Calibration Details



Number of Calibrated Images	93 out of 93
Number of Geolocated Images	93 out of 93

Initial Image Positions

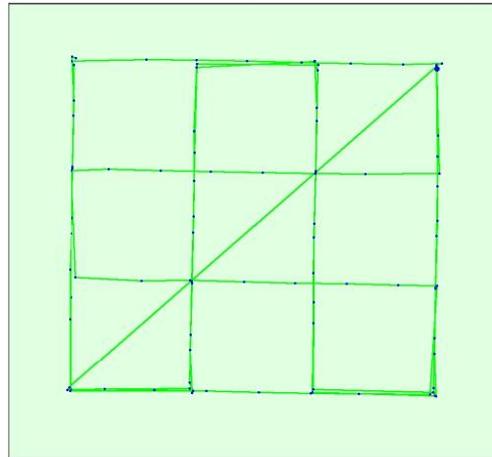
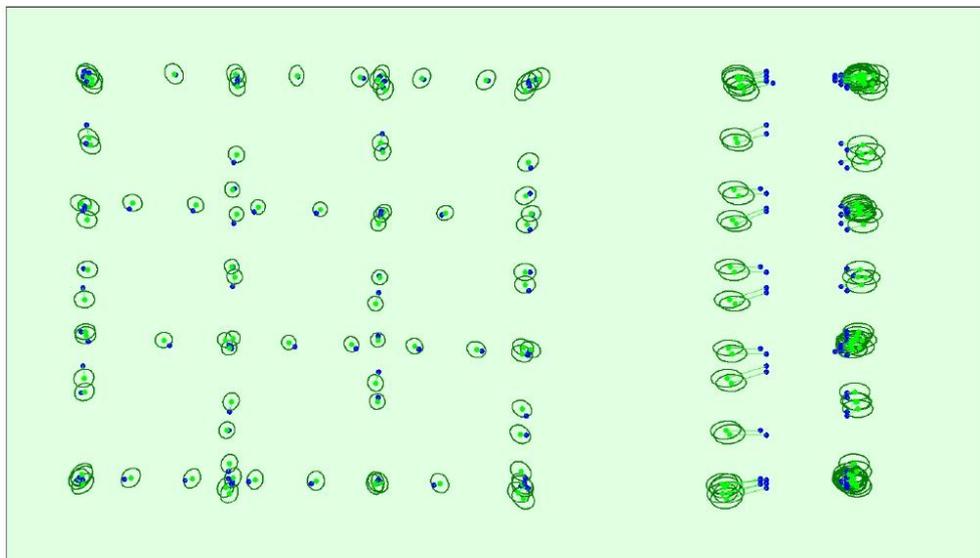
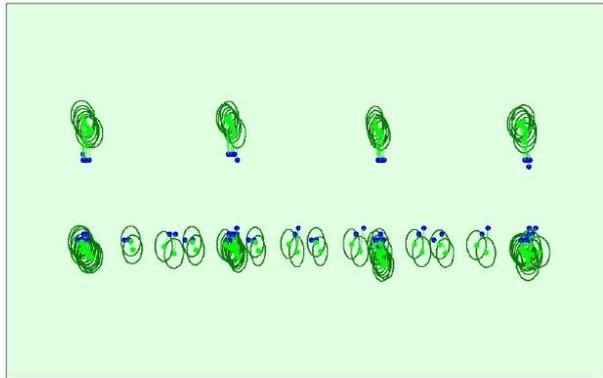


Figure 2: Top view of the initial image position. The green line follows the position of the images in time starting from the large blue dot.

Computed Image/GCPs/Manual Tie Points Positions





Uncertainty ellipses 10x magnified

Figure 3: Offset between initial (blue dots) and computed (green dots) image positions as well as the offset between the GCPs initial positions (blue crosses) and their computed positions (green crosses) in the top-view (XY plane), front-view (XZ plane), and side-view (YZ plane). Dark green ellipses indicate the absolute position uncertainty of the bundle block adjustment result.

Absolute camera position and orientation uncertainties

	X[m]	Y[m]	Z[m]	Omega [degree]	Phi [degree]	Kappa [degree]
Mean	0.151	0.149	0.242	0.081	0.088	0.114
Sigma	0.020	0.018	0.004	0.000	0.002	0.008

Overlap

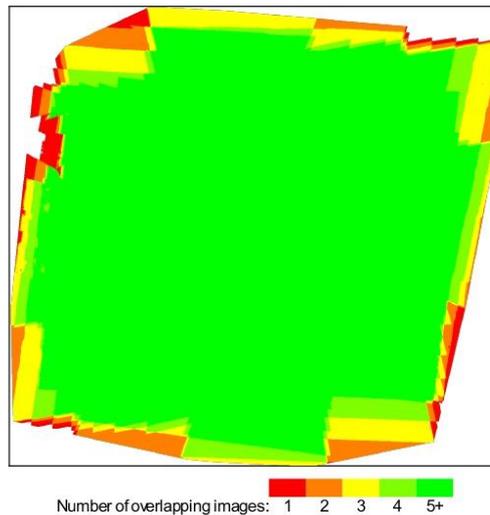


Figure 4: Number of overlapping images computed for each pixel of the orthomosaic. Red and yellow areas indicate low overlap for which poor results may be generated. Green areas indicate an overlap of over 5 images for every pixel. Good quality results will be generated as long as the number of keypoint matches is also sufficient for these areas (see Figure 5 for keypoint matches).

Bundle Block Adjustment Details

Number of 2D Keypoint Observations for Bundle Block Adjustment	2831364
Number of 3D Points for Bundle Block Adjustment	802560

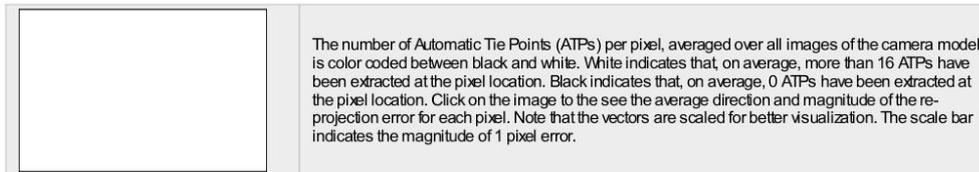
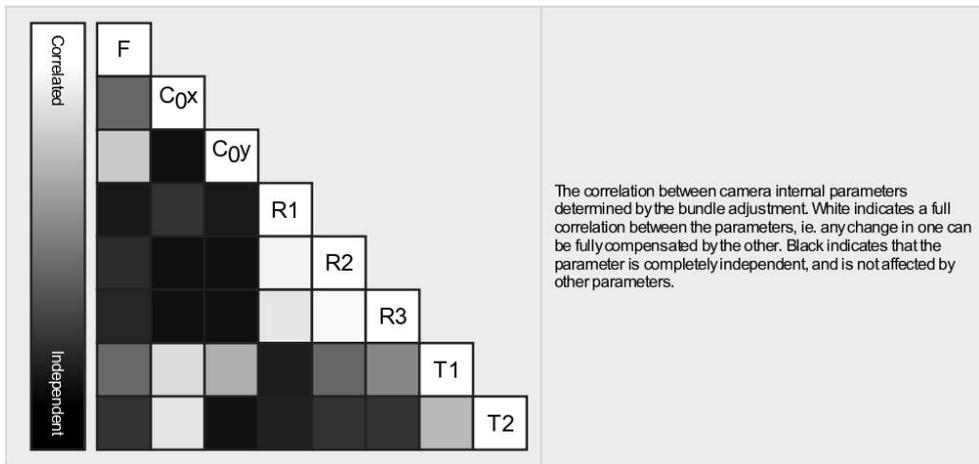
Mean Reprojection Error [pixels]	0.333
----------------------------------	-------

Internal Camera Parameters

L1D-20c_10.3_5472x3648 (RGB). Sensor Dimensions: 12.825 [mm] x 8.550 [mm]

EXIF ID: L1D20c_10.3_5472x3648

	Focal Length	Principal Point x	Principal Point y	R1	R2	R3	T1	T2
Initial Values	4470.830 [pixel] 10.479 [mm]	2770.870 [pixel] 6.494 [mm]	1698.700 [pixel] 3.981 [mm]	0.009	0.040	-0.050	-0.003	0.002
Optimized Values	4343.746 [pixel] 10.181 [mm]	2744.158 [pixel] 6.432 [mm]	1801.480 [pixel] 4.222 [mm]	0.011	-0.013	0.018	0.002	-0.001
Uncertainties (Sigma)	0.184 [pixel] 0.000 [mm]	0.101 [pixel] 0.000 [mm]	0.125 [pixel] 0.000 [mm]	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000



2D Keypoints Table

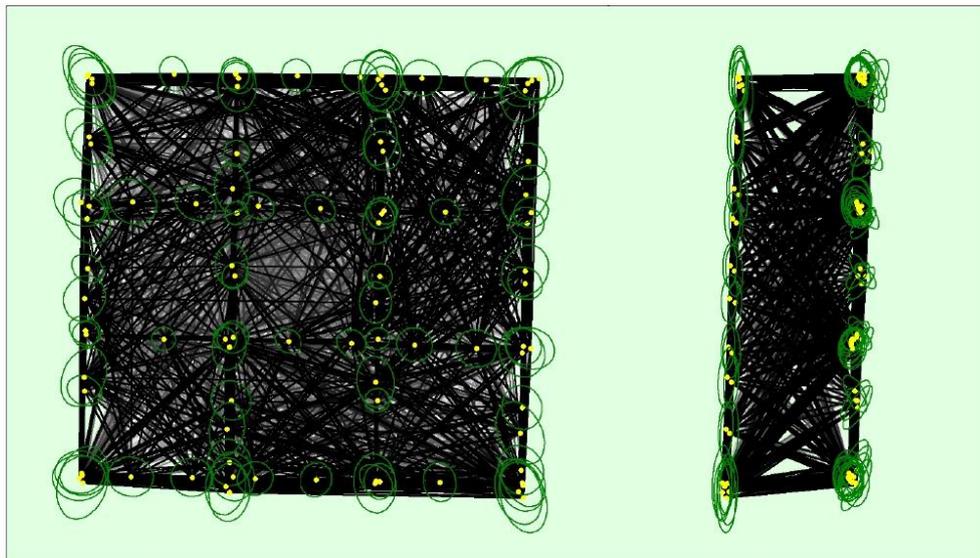
	Number of 2D Keypoints per Image	Number of Matched 2D Keypoints per Image
Median	53059	29054
Mn	37996	19029
Max	76563	49874
Mean	53647	30445

3D Points from 2D Keypoint Matches

	Number of 3D Points Observed
In 2 Images	439248
In 3 Images	146087
In 4 Images	71560
In 5 Images	40650
In 6 Images	26290
In 7 Images	17926
In 8 Images	12810

In 9 Images	9468
In 10 Images	7426
In 11 Images	5764
In 12 Images	4651
In 13 Images	3680
In 14 Images	3031
In 15 Images	2498
In 16 Images	2037
In 17 Images	1679
In 18 Images	1334
In 19 Images	1167
In 20 Images	920
In 21 Images	777
In 22 Images	680
In 23 Images	556
In 24 Images	479
In 25 Images	373
In 26 Images	324
In 27 Images	261
In 28 Images	220
In 29 Images	179
In 30 Images	148
In 31 Images	80
In 32 Images	87
In 33 Images	64
In 34 Images	43
In 35 Images	28
In 36 Images	16
In 37 Images	9
In 38 Images	4
In 39 Images	4
In 40 Images	2

2D Keypoint Matches



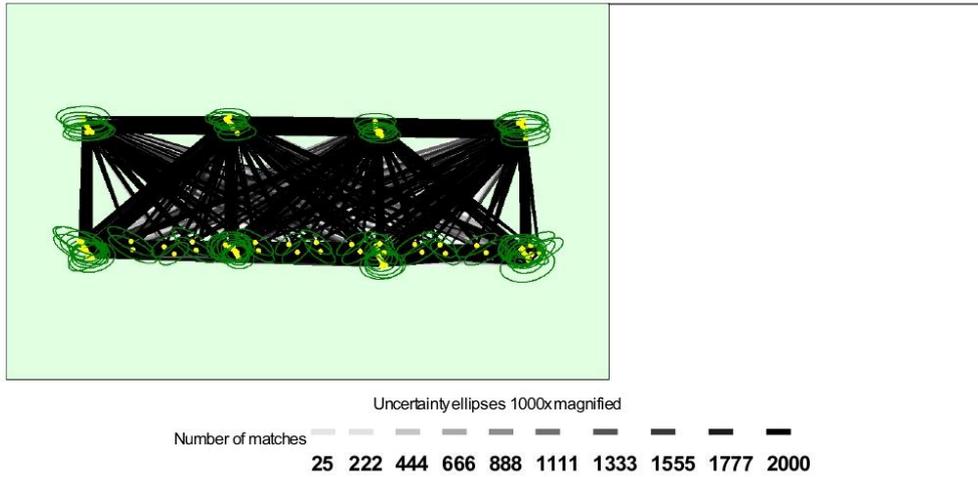


Figure 5: Computed image positions with links between matched images. The darkness of the links indicates the number of matched 2D keypoints between the images. Bright links indicate weak links and require manual tie points or more images. Dark green ellipses indicate the relative camera position uncertainty of the bundle block adjustment result.

Relative camera position and orientation uncertainties

	X[m]	Y[m]	Z[m]	Omega [degree]	Phi [degree]	Kappa [degree]
Mean	0.003	0.003	0.002	0.003	0.003	0.002
Sigma	0.001	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000

Geolocation Details

Absolute Geolocation Variance

Min Error [m]	Max Error [m]	Geolocation Error X[%]	Geolocation Error Y[%]	Geolocation Error Z [%]
-	-15.00	0.00	0.00	0.00
-15.00	-12.00	0.00	0.00	0.00
-12.00	-9.00	0.00	0.00	0.00
-9.00	-6.00	0.00	0.00	6.45
-6.00	-3.00	0.00	0.00	23.66
-3.00	0.00	49.46	61.29	0.00
0.00	3.00	50.54	38.71	45.16
3.00	6.00	0.00	0.00	24.73
6.00	9.00	0.00	0.00	0.00
9.00	12.00	0.00	0.00	0.00
12.00	15.00	0.00	0.00	0.00
15.00	-	0.00	0.00	0.00
Mean [m]		-0.000001	0.000000	-0.000000
Sigma [m]		0.545590	0.912143	3.631273
RMS Error [m]		0.545590	0.912143	3.631273

Min Error and Max Error represent geolocation error intervals between -1.5 and 1.5 times the maximum accuracy of all the images. Columns X, Y, Z show the percentage of images with geolocation errors within the predefined error intervals. The geolocation error is the difference between the initial and computed image positions. Note that the image geolocation errors do not correspond to the accuracy of the observed 3D points.

Relative Geolocation Variance

Relative Geolocation Error	Images X[%]	Images Y[%]	Images Z[%]
[-1.00, 1.00]	100.00	100.00	100.00
[-2.00, 2.00]	100.00	100.00	100.00
[-3.00, 3.00]	100.00	100.00	100.00
Mean of Geolocation Accuracy [m]	5.000000	5.000000	10.000000
Sigma of Geolocation Accuracy [m]	0.000000	0.000000	0.000000

Images X, Y, Z represent the percentage of images with a relative geolocation error in X, Y, Z.

Geolocation Orientational Variance	RMS [degree]
Omega	3.710
Phi	2.831
Kappa	7.957

Geolocation RMS error of the orientation angles given by the difference between the initial and computed image orientation angles.

Initial Processing Details

System Information

Hardware	CPU: AMD Ryzen 5 3500U with Radeon Vega Mobile Gfx RAM: 22GB GPU: AMD Radeon(TM) Vega 8 Graphics (Driver: 27.20.1028.1), Radeon 540X Series (Driver: 27.20.1028.1)
Operating System	Windows 10 Home Single Language, 64-bit

Coordinate Systems

Image Coordinate System	WGS 84 (EGM96 Geoid)
Output Coordinate System	WGS 84 / UTMzone 21S (EGM96 Geoid)

Processing Options

Detected Template	No Template Available
Keypoints Image Scale	Full, Image Scale: 1
Advanced: Matching Image Pairs	Aerial Grid or Corridor
Advanced: Matching Strategy	Use Geometrically Verified Matching: yes
Advanced: Keypoint Extraction	Targeted Number of Keypoints: Automatic
Advanced: Calibration	Calibration Method: Standard Internal Parameters Optimization: All External Parameters Optimization: All Rematch: Auto, yes

Point Cloud Densification details

Processing Options

Image Scale	multiscale, 1/2 (Half image size, Default)
Point Density	Optimal
Minimum Number of Matches	3
3D Textured Mesh Generation	yes
3D Textured Mesh Settings:	Resolution: High Resolution Color Balancing: yes
LOD	Generated: no

Advanced: 3D Textured Mesh Settings	Sample Density Divider: 1
Advanced: Image Groups	group1
Advanced: Use Processing Area	yes
Advanced: Use Annotations	yes
Time for Point Cloud Densification	40m:26s
Time for Point Cloud Classification	NA
Time for 3D Textured Mesh Generation	43m:18s

Results



Number of Generated Tiles	1
Number of 3D Densified Points	10438066
Average Density (per m ³)	475.61

DSM, Orthomosaic and Index Details



Processing Options



DSM and Orthomosaic Resolution	1 x GSD (202 [cm/pixel])
DSM Filters	Noise Filtering: yes Surface Smoothing: yes, Type: Sharp
Raster DSM	Generated: yes Method: Inverse Distance Weighting Merge Tiles: yes
Orthomosaic	Generated: yes Merge Tiles: yes GeoTIFF Without Transparency: no Google Maps Tiles and KML: no
Time for DSM Generation	24m:07s
Time for Orthomosaic Generation	25m:18s
Time for DTM Generation	00s
Time for Contour Lines Generation	00s
Time for Reflectance Map Generation	00s
Time for Index Map Generation	00s

Quality Report



Generated with Pix4Denterprise version 4.4.12

Important: Click on the different icons for:

- Help to analyze the results in the Quality Report
- Additional information about the sections

Click [here](#) for additional tips to analyze the Quality Report

Summary

Project	uffs_prof
Processed	2022-07-06 13:50:13
Camera Model Name(s)	L1D-20c_10.3_5472x3648 (RGB)
Average Ground Sampling Distance (GSD)	1.97 cm / 0.77 in
Area Covered	0.041 km ² / 4.0556 ha / 0.02 sq. mi. / 10.0268 acres
Time for Initial Processing (without report)	01h:35m:34s

Quality Check

Images	median of 56018 keypoints per image	✓
Dataset	93 out of 93 images calibrated (100%), all images enabled	✓
Camera Optimization	2.49% relative difference between initial and optimized internal camera parameters	✓
Matching	median of 28545.8 matches per calibrated image	✓
Georeferencing	yes, no 3D GCP	⚠

Preview

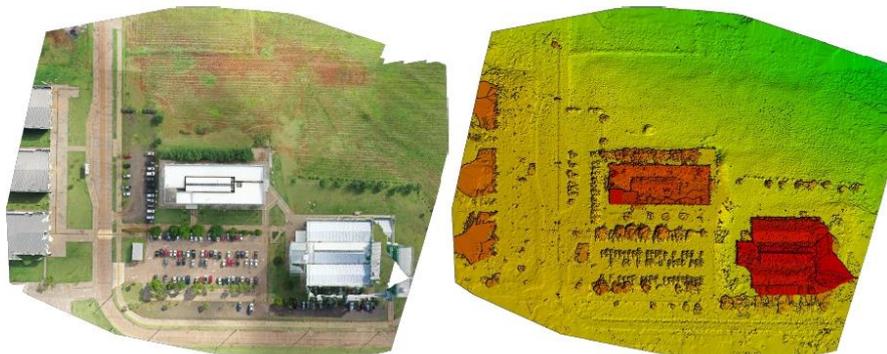


Figure 1: Orthomosaic and the corresponding sparse Digital Surface Model (DSM) before densification.

Calibration Details

Number of Calibrated Images	93 out of 93
Number of Geolocated Images	93 out of 93

Initial Image Positions

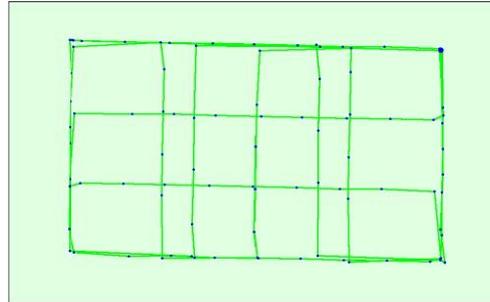
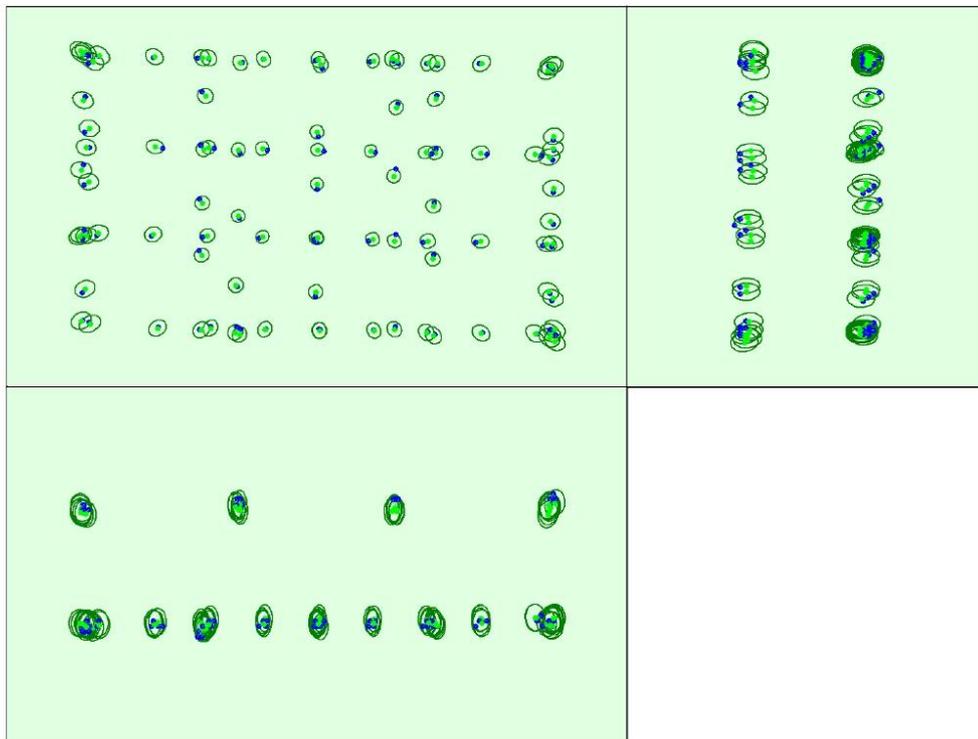


Figure 2: Top view of the initial image position. The green line follows the position of the images in time starting from the large blue dot.

Computed Image/GCPs/Manual Tie Points Positions



Uncertainty ellipses 10x magnified

Figure 3: Offset between initial (blue dots) and computed (green dots) image positions as well as the offset between the GCPs initial positions (blue crosses) and their computed positions (green crosses) in the top-view (XY plane), front-view (XZ plane), and side-view (YZ plane). Dark green ellipses indicate the absolute position uncertainty of the bundle block adjustment result.

Absolute camera position and orientation uncertainties

	X[m]	Y[m]	Z[m]	Omega [degree]	Phi [degree]	Kappa [degree]
Mean	0.163	0.151	0.254	0.087	0.093	0.120
Sigma	0.028	0.015	0.005	0.001	0.002	0.009

Overlap

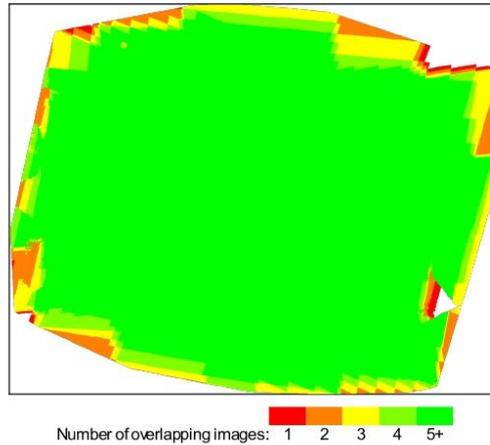


Figure 4: Number of overlapping images computed for each pixel of the orthomosaic. Red and yellow areas indicate low overlap for which poor results may be generated. Green areas indicate an overlap of over 5 images for every pixel. Good quality results will be generated as long as the number of keypoint matches is also sufficient for these areas (see Figure 5 for keypoint matches).

Bundle Block Adjustment Details

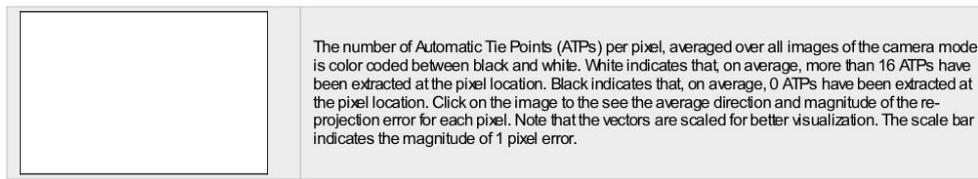
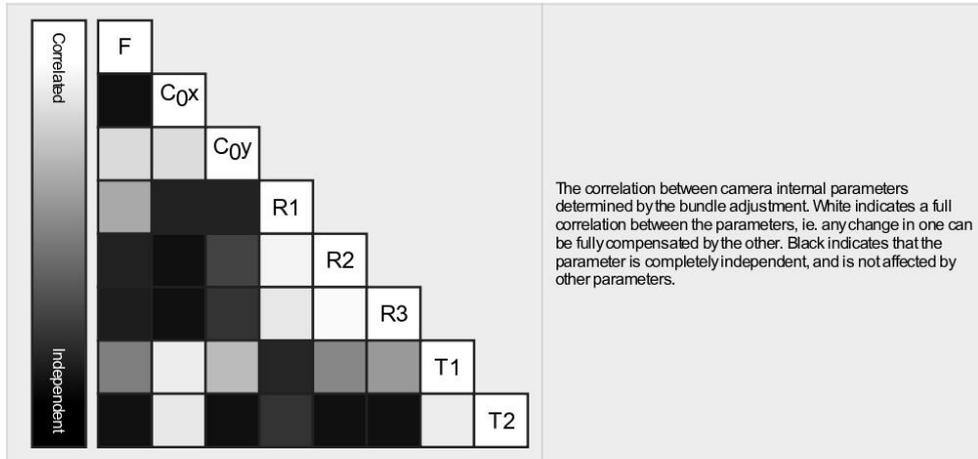
Number of 2D Keypoint Observations for Bundle Block Adjustment	2740380
Number of 3D Points for Bundle Block Adjustment	799957
Mean Reprojection Error [pixels]	0.327

Internal Camera Parameters

L1D-20c_10.3_5472x3648 (RGB). Sensor Dimensions: 12.825 [mm] x 8.550 [mm]

EXIF ID: L1D-20c_10.3_5472x3648

	Focal Length	Principal Pointx	Principal Pointy	R1	R2	R3	T1	T2
Initial Values	4470.830 [pixel] 10.479 [mm]	2770.870 [pixel] 6.494 [mm]	1698.700 [pixel] 3.981 [mm]	0.009	0.040	-0.050	-0.003	0.002
Optimized Values	4359.153 [pixel] 10.217 [mm]	2745.616 [pixel] 6.435 [mm]	1794.860 [pixel] 4.207 [mm]	0.013	-0.007	0.007	0.001	-0.000
Uncertainties (Sigma)	0.221 [pixel] 0.001 [mm]	0.105 [pixel] 0.000 [mm]	0.148 [pixel] 0.000 [mm]	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000



2D Keypoints Table

	Number of 2D Keypoints per Image	Number of Matched 2D Keypoints per Image
Median	56018	28546
Mn	37245	17832
Max	77045	48397
Mean	57244	29466

3D Points from 2D Keypoint Matches

	Number of 3D Points Observed
In 2 Images	454857
In 3 Images	138570
In 4 Images	68858
In 5 Images	40824
In 6 Images	25887
In 7 Images	17486
In 8 Images	12112
In 9 Images	8693
In 10 Images	6573
In 11 Images	4942
In 12 Images	3877
In 13 Images	2873
In 14 Images	2394
In 15 Images	1892
In 16 Images	1567
In 17 Images	1352
In 18 Images	1061
In 19 Images	906
In 20 Images	755
In 21 Images	620
In 22 Images	573
In 23 Images	503

In 24 Images	417
In 25 Images	369
In 26 Images	326
In 27 Images	265
In 28 Images	213
In 29 Images	191
In 30 Images	171
In 31 Images	159
In 32 Images	130
In 33 Images	95
In 34 Images	86
In 35 Images	91
In 36 Images	70
In 37 Images	61
In 38 Images	50
In 39 Images	38
In 40 Images	27
In 41 Images	17
In 42 Images	3
In 43 Images	1
In 44 Images	2

2D Keypoint Matches

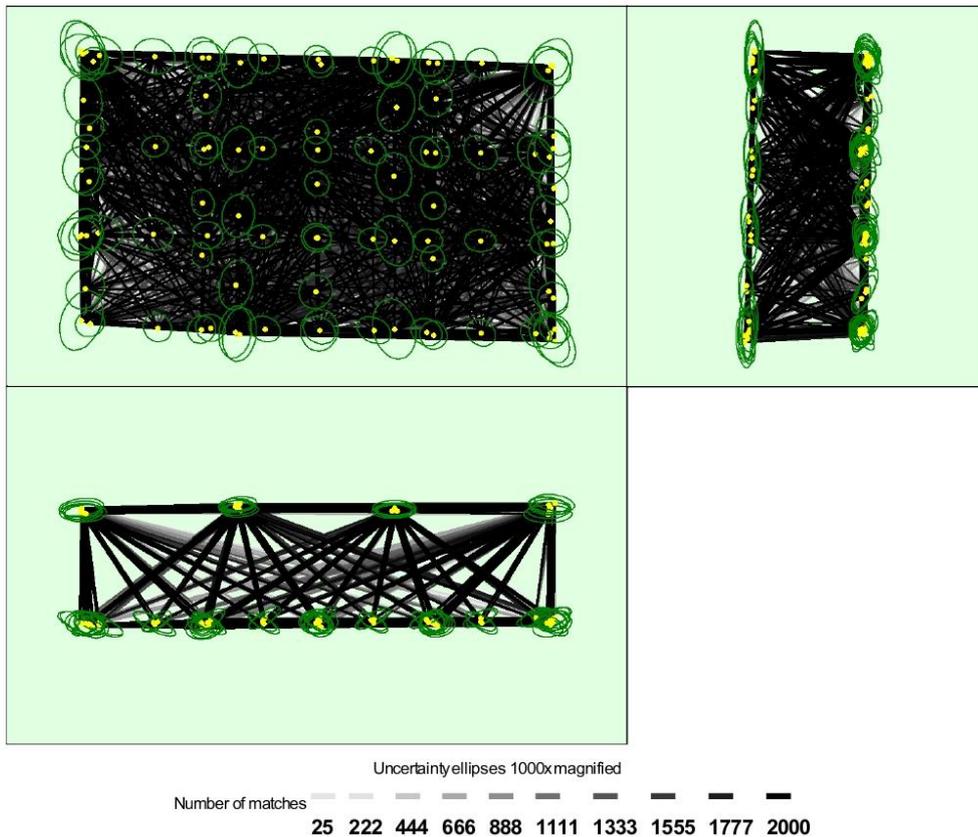


Figure 5: Computed image positions with links between matched images. The darkness of the links indicates the number of matched 2D keypoints between the images. Bright links indicate weak links and require manual tie points or more images. Dark green ellipses indicate the relative camera position uncertainty of the bundle block adjustment result.

Relative camera position and orientation uncertainties

	X[m]	Y[m]	Z[m]	Omega [degree]	Phi [degree]	Kappa [degree]
Mean	0.003	0.003	0.002	0.003	0.003	0.002
Sigma	0.001	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000

Geolocation Details

Absolute Geolocation Variance

Mn Error [m]	Max Error [m]	Geolocation Error X[%]	Geolocation Error Y[%]	Geolocation Error Z[%]
-	-15.00	0.00	0.00	0.00
-15.00	-12.00	0.00	0.00	0.00
-12.00	-9.00	0.00	0.00	0.00
-9.00	-6.00	0.00	0.00	0.00
-6.00	-3.00	0.00	0.00	0.00
-3.00	0.00	44.09	61.29	56.99
0.00	3.00	55.91	38.71	43.01
3.00	6.00	0.00	0.00	0.00
6.00	9.00	0.00	0.00	0.00
9.00	12.00	0.00	0.00	0.00
12.00	15.00	0.00	0.00	0.00
15.00	-	0.00	0.00	0.00
Mean [m]		0.004103	0.005453	0.012606
Sigma [m]		0.531746	0.562502	1.076859
RMS Error [m]		0.531762	0.562529	1.076933

Min Error and Max Error represent geolocation error intervals between -1.5 and 1.5 times the maximum accuracy of all the images. Columns X, Y, Z show the percentage of images with geolocation errors within the predefined error intervals. The geolocation error is the difference between the initial and computed image positions. Note that the image geolocation errors do not correspond to the accuracy of the observed 3D points.

Relative Geolocation Variance

Relative Geolocation Error	Images X[%]	Images Y[%]	Images Z[%]
[-1.00, 1.00]	100.00	100.00	100.00
[-2.00, 2.00]	100.00	100.00	100.00
[-3.00, 3.00]	100.00	100.00	100.00
Mean of Geolocation Accuracy [m]	5.000000	5.000000	10.000000
Sigma of Geolocation Accuracy [m]	0.000000	0.000000	0.000000

Images X, Y, Z represent the percentage of images with a relative geolocation error in X, Y, Z.

Geolocation Orientational Variance	RMS [degree]
Omega	6.545
Phi	4.966
Kappa	24.783

Geolocation RMS error of the orientation angles given by the difference between the initial and computed image orientation angles.

Initial Processing Details

System Information ?

Hardware	CPU: AMD Ryzen 5 3500U with Radeon Vega Mobile Gfx RAM: 22GB GPU: AMD Radeon(TM) Vega 8 Graphics (Driver: 27.20.1028.1), Radeon 540X Series (Driver: 27.20.1028.1)
Operating System	Windows 10 Home Single Language, 64-bit

Coordinate Systems ?

Image Coordinate System	WGS 84 (EGM96 Geoid)
Output Coordinate System	WGS 84 / UTMzone 21S (EGM96 Geoid)

Processing Options ?

Detected Template	No Template Available
Keypoints Image Scale	Full, Image Scale: 1
Advanced: Matching Image Pairs	Aerial Grid or Corridor
Advanced: Matching Strategy	Use Geometrically Verified Matching: yes
Advanced: Keypoint Extraction	Targeted Number of Keypoints: Automatic
Advanced: Calibration	Calibration Method: Standard Internal Parameters Optimization: All External Parameters Optimization: All Rematch: Auto, yes

Point Cloud Densification details ?

Processing Options ?

Image Scale	multiscale, 1 (Original image size, Slow)
Point Density	Optimal
Minimum Number of Matches	3
3D Textured Mesh Generation	yes
3D Textured Mesh Settings:	Resolution: Medium Resolution (default) Color Balancing: no
LOD	Generated: no
Advanced: 3D Textured Mesh Settings	Sample Density Divider: 1
Advanced: Image Groups	group1
Advanced: Use Processing Area	yes
Advanced: Use Annotations	yes
Time for Point Cloud Densification	04h:08m:49s
Time for Point Cloud Classification	NA
Time for 3D Textured Mesh Generation	30m:28s

Results ?

Number of Generated Tiles	4
Number of 3D Densified Points	41391790
Average Density (per m ³)	1294.44

DSM, Orthomosaic and Index Details ?

Processing Options ?

DSM and Orthomosaic Resolution	1 x GSD (1.97 [cm/pixel])
--------------------------------	---------------------------

DSM Filters	Noise Filtering: yes Surface Smoothing: yes, Type: Sharp
Raster DSM	Generated: yes Method: Inverse Distance Weighting Merge Tiles: yes
Orthomosaic	Generated: yes Merge Tiles: yes GeoTIFF Without Transparency: no Google Maps Tiles and KML: no
Time for DSM Generation	01h:31m:54s
Time for Orthomosaic Generation	27m:10s
Time for DTM Generation	00s
Time for Contour Lines Generation	00s
Time for Reflectance Map Generation	00s
Time for Index Map Generation	00s

Quality Report



Generated with Pix4Denterprise version 4.4.12

Important: Click on the different icons for:

- Help to analyze the results in the Quality Report
- Additional information about the sections

Click [here](#) for additional tips to analyze the Quality Report

Summary ?

Project	uffs_lab
Processed	2022-07-09 05:36:55
Camera Model Name(s)	L1D-20c_10.3_5472x3648 (RGB)
Average Ground Sampling Distance (GSD)	2.00 cm / 0.79 in
Area Covered	0.063 km ² / 6.2836 ha / 0.02 sq. mi. / 15.5351 acres
Time for Initial Processing (without report)	03h:17m:13s

Quality Check ?

Images	median of 58194 keypoints per image	✓
Dataset	171 out of 171 images calibrated (100%), all images enabled	✓
Camera Optimization	3.23% relative difference between initial and optimized internal camera parameters	✓
Matching	median of 29667.2 matches per calibrated image	✓
Georeferencing	yes, no 3D GCP	⚠

Preview ?

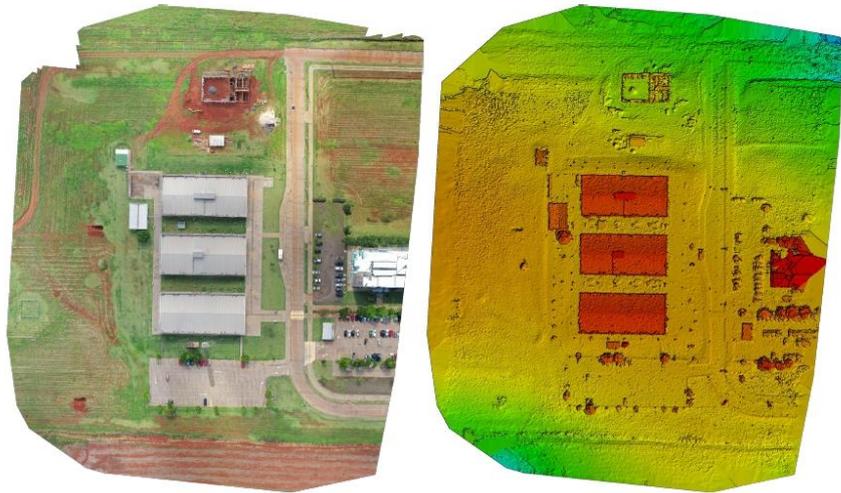


Figure 1: Orthomosaic and the corresponding sparse Digital Surface Model (DSM) before densification.

Calibration Details

Number of Calibrated Images	171 out of 171
Number of Geolocated Images	171 out of 171

Initial Image Positions

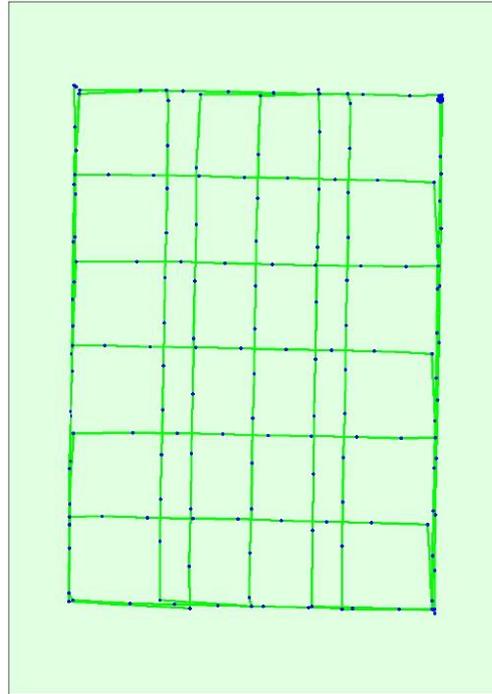


Figure 2: Top view of the initial image position. The green line follows the position of the images in time starting from the large blue dot.

Computed Image/GCPs/Manual Tie Points Positions

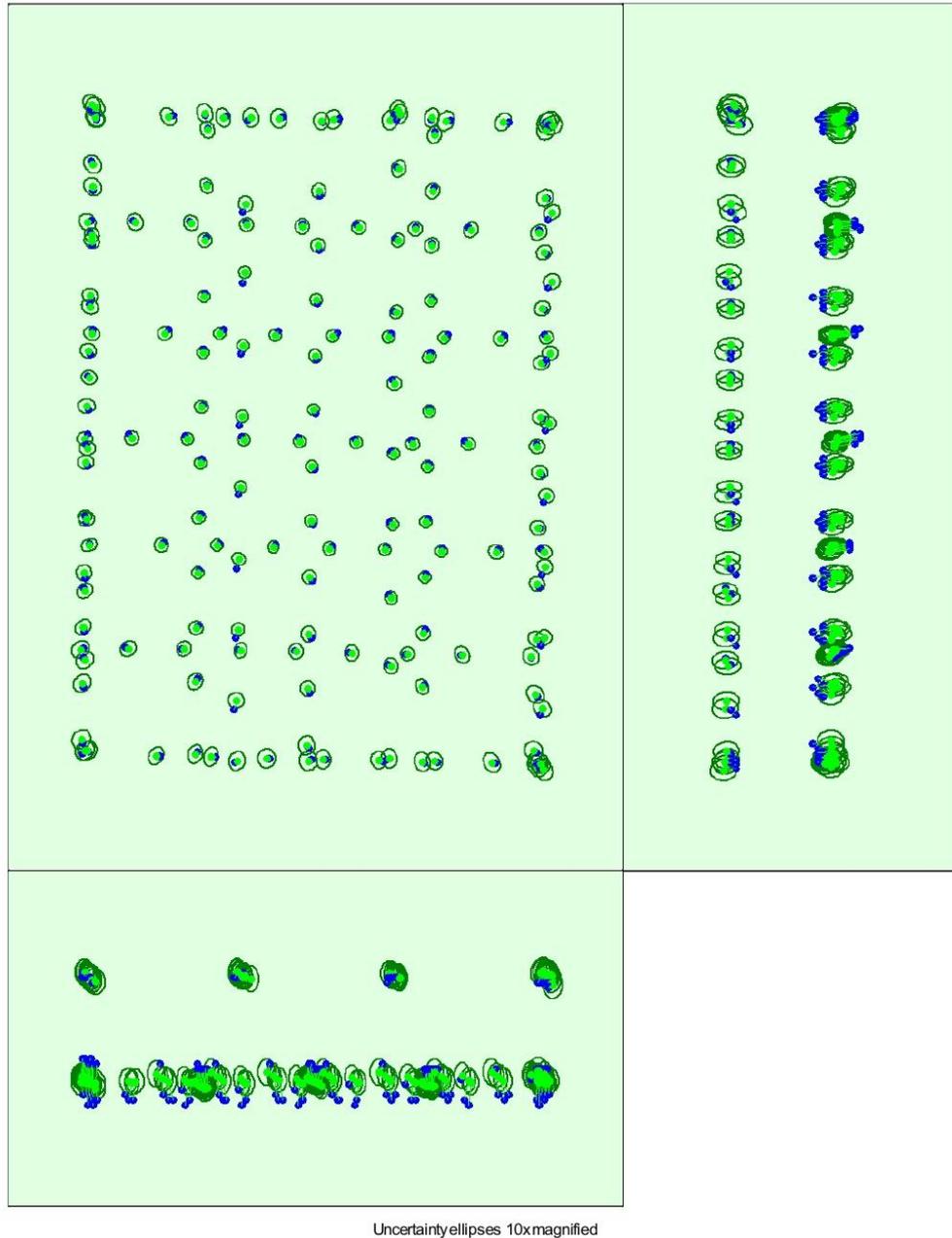


Figure 3: Offset between initial (blue dots) and computed (green dots) image positions as well as the offset between the GCPs initial positions (blue crosses) and their computed positions (green crosses) in the top-view (XY plane), front-view (XZ plane), and side-view (YZ plane). Dark green ellipses indicate the absolute position uncertainty of the bundle block adjustment result.

🔍 Absolute camera position and orientation uncertainties



	X[m]	Y[m]	Z[m]	Omega [degree]	Phi [degree]	Kappa [degree]
Mean	0.150	0.155	0.244	0.081	0.087	0.098
Sigma	0.019	0.024	0.007	0.000	0.001	0.008

? Overlap

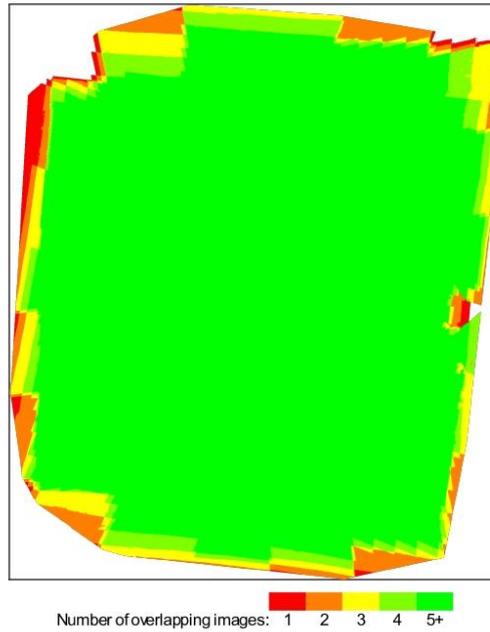


Figure 4: Number of overlapping images computed for each pixel of the orthomosaic. Red and yellow areas indicate low overlap for which poor results may be generated. Green areas indicate an overlap of over 5 images for every pixel. Good quality results will be generated as long as the number of keypoint matches is also sufficient for these areas (see Figure 5 for keypoint matches).

Bundle Block Adjustment Details



Number of 2D Keypoint Observations for Bundle Block Adjustment	5153762
Number of 3D Points for Bundle Block Adjustment	1457931
Mean Reprojection Error [pixels]	0.330

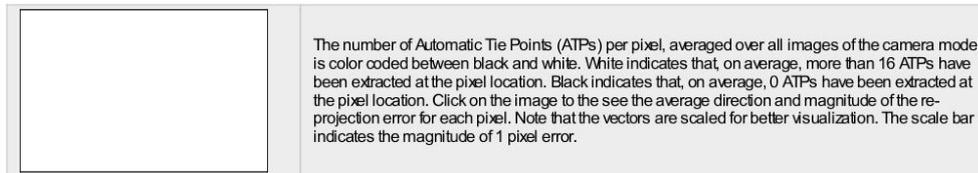
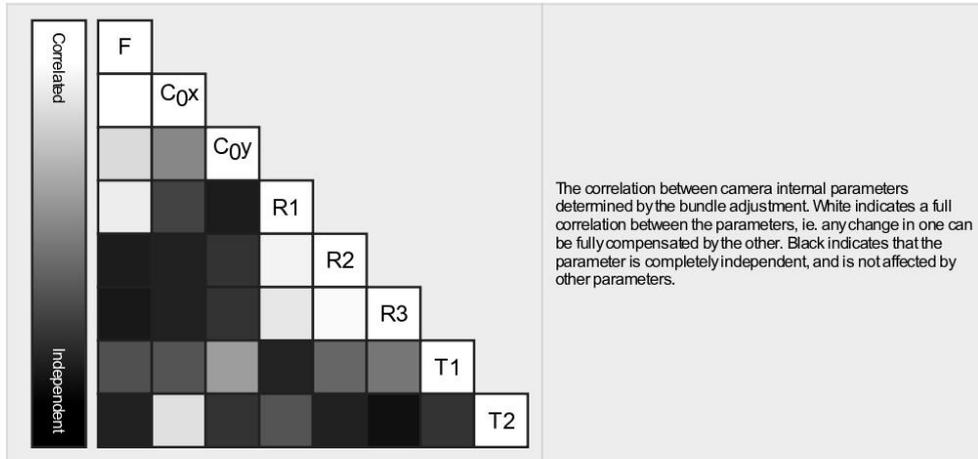
? Internal Camera Parameters

L1D-20c_10.3_5472x3648 (RGB). Sensor Dimensions: 12.825 [mm] x 8.550 [mm]



EXIF ID: L1D-20c_10.3_5472x3648

	Focal Length	Principal Point x	Principal Point y	R1	R2	R3	T1	T2
Initial Values	4470.830 [pixel] 10.479 [mm]	2770.870 [pixel] 6.494 [mm]	1698.700 [pixel] 3.981 [mm]	0.009	0.040	-0.050	-0.003	0.002
Optimized Values	4326.039 [pixel] 10.139 [mm]	2743.637 [pixel] 6.430 [mm]	1804.268 [pixel] 4.229 [mm]	0.012	-0.014	0.018	0.001	-0.001
Uncertainties (Sigma)	0.264 [pixel] 0.001 [mm]	0.098 [pixel] 0.000 [mm]	0.155 [pixel] 0.000 [mm]	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000



2D Keypoints Table

	Number of 2D Keypoints per Image	Number of Matched 2D Keypoints per Image
Median	58194	29667
Mn	32788	13288
Max	83383	49120
Mean	57585	30139

3D Points from 2D Keypoint Matches

	Number of 3D Points Observed
In 2 Images	837792
In 3 Images	250160
In 4 Images	120450
In 5 Images	68501
In 6 Images	42963
In 7 Images	28855
In 8 Images	21173
In 9 Images	15710
In 10 Images	12095
In 11 Images	9817
In 12 Images	7720
In 13 Images	6255
In 14 Images	5292
In 15 Images	4440
In 16 Images	3715
In 17 Images	3095
In 18 Images	2764
In 19 Images	2383
In 20 Images	2099
In 21 Images	1765
In 22 Images	1444
In 23 Images	1308

In 24 Images	1171
In 25 Images	1038
In 26 Images	816
In 27 Images	759
In 28 Images	655
In 29 Images	502
In 30 Images	479
In 31 Images	414
In 32 Images	339
In 33 Images	304
In 34 Images	251
In 35 Images	201
In 36 Images	175
In 37 Images	158
In 38 Images	139
In 39 Images	129
In 40 Images	101
In 41 Images	89
In 42 Images	84
In 43 Images	60
In 44 Images	58
In 45 Images	55
In 46 Images	33
In 47 Images	31
In 48 Images	20
In 49 Images	19
In 50 Images	23
In 51 Images	7
In 52 Images	12
In 53 Images	6
In 54 Images	3
In 55 Images	3
In 56 Images	1

2D Keypoint Matches



Geolocation Details

Absolute Geolocation Variance

Min Error [m]	Max Error [m]	Geolocation Error X[%]	Geolocation Error Y[%]	Geolocation Error Z[%]
-	-15.00	0.00	0.00	0.00
-15.00	-12.00	0.00	0.00	0.00
-12.00	-9.00	0.00	0.00	0.00
-9.00	-6.00	0.00	0.00	0.00
-6.00	-3.00	0.00	0.00	23.39
-3.00	0.00	42.11	42.69	27.49
0.00	3.00	57.89	57.31	28.07
3.00	6.00	0.00	0.00	21.05
6.00	9.00	0.00	0.00	0.00
9.00	12.00	0.00	0.00	0.00
12.00	15.00	0.00	0.00	0.00
15.00	-	0.00	0.00	0.00
Mean [m]		0.000000	-0.000000	-0.000000
Sigma [m]		0.470467	0.698298	2.774921
RMS Error [m]		0.470467	0.698298	2.774921

Min Error and Max Error represent geolocation error intervals between -1.5 and 1.5 times the maximum accuracy of all the images. Columns X, Y, Z show the percentage of images with geolocation errors within the predefined error intervals. The geolocation error is the difference between the initial and computed image positions. Note that the image geolocation errors do not correspond to the accuracy of the observed 3D points.

Relative Geolocation Variance

Relative Geolocation Error	Images X [%]	Images Y [%]	Images Z [%]
[-1.00, 1.00]	100.00	100.00	100.00
[-2.00, 2.00]	100.00	100.00	100.00
[-3.00, 3.00]	100.00	100.00	100.00
Mean of Geolocation Accuracy [m]	5.000000	5.000000	10.000000
Sigma of Geolocation Accuracy [m]	0.000000	0.000000	0.000000

Images X, Y, Z represent the percentage of images with a relative geolocation error in X, Y, Z.

Geolocation Orientational Variance	RMS [degree]
Omega	3.909
Phi	3.636
Kappa	9.658

Geolocation RMS error of the orientation angles given by the difference between the initial and computed image orientation angles.

Initial Processing Details

System Information

Hardware	CPU: AMD Ryzen 5 3500U with Radeon Vega Mobile Gfx RAM: 22GB GPU: AMD Radeon(TM) Vega 8 Graphics (Driver: 27.20.1028.1), Radeon 540X Series (Driver: 27.20.1028.1)
----------	--

Operating System	Windows 10 Home Single Language, 64-bit
------------------	---

Coordinate Systems ?

Image Coordinate System	WGS 84 (EGM96 Geoid)
Output Coordinate System	WGS 84 / UTMzone 21S (EGM96 Geoid)

Processing Options ?

Detected Template	No Template Available
Keypoints Image Scale	Full, Image Scale: 1
Advanced: Matching Image Pairs	Aerial Grid or Corridor
Advanced: Matching Strategy	Use Geometrically Verified Matching: yes
Advanced: Keypoint Extraction	Targeted Number of Keypoints: Automatic
Advanced: Calibration	Calibration Method: Standard Internal Parameters Optimization: All External Parameters Optimization: All Rematch: Auto, yes

Point Cloud Densification details ?

Processing Options ?

Image Scale	multiscale, 1 (Original image size, Slow)
Point Density	Optimal
Minimum Number of Matches	3
3D Textured Mesh Generation	yes
3D Textured Mesh Settings:	Resolution: Medium Resolution (default) Color Balancing: no
LOD	Generated: no
Advanced: 3D Textured Mesh Settings	Sample Density Divider: 1
Advanced: Image Groups	group1
Advanced: Use Processing Area	yes
Advanced: Use Annotations	yes
Time for Point Cloud Densification	15h:11m:34s
Time for Point Cloud Classification	NA
Time for 3D Textured Mesh Generation	25m:39s

Results ?

Number of Processed Clusters	2
Number of Generated Tiles	11
Number of 3D Densified Points	78721921
Average Density (per m ³)	788.27

DSM, Orthomosaic and Index Details ?

Processing Options ?

DSM and Orthomosaic Resolution	1 x GSD (2 [cm/pixel])
DSM Filters	Noise Filtering: yes Surface Smoothing: yes, Type: Sharp
Raster DSM	Generated: yes Method: Inverse Distance Weighting Merge Tiles: yes

Orthomosaic	Generated: yes Merge Tiles: yes GeoTIFF Without Transparency: no Google Maps Tiles and KML: no
Time for DSM Generation	01h:29m:27s
Time for Orthomosaic Generation	34m:05s
Time for DTM Generation	00s
Time for Contour Lines Generation	00s
Time for Reflectance Map Generation	00s
Time for Index Map Generation	00s