

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**

Instituto de Geociências

Programa de Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais

Guilherme Gandra Franco

**MODELAGEM TRIDIMENSIONAL COM O ALGORITMO *STRUCTURE FROM MOTION* (SfM) PARA ANÁLISE DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA EM TELHADOS.**

**Estudo de caso na vila caiçara de Picinguaba, Ubatuba-SP**

Belo Horizonte,  
2021

Guilherme Gandra Franco

**MODELAGEM TRIDIMENSIONAL COM O ALGORITMO STRUCTURE FROM  
MOTION (SfM) PARA ANÁLISE DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA  
FOTOVOLTAICA EM TELHADOS.**

**Estudo de caso na vila caiçara de Picinguaba, Ubatuba-SP**

**Versão final**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais.

Orientador: Dr. André Luiz Fonseca Naime

Coorientadora: Dra. Sônia Maria Carvalho Ribeiro

Belo Horizonte,  
2021

F825m Franco, Guilherme Gandra.  
2021 Modelagem tridimensional com o algoritmo Structure From Motion (SFM) para análise do potencial de geração de energia fotovoltaica em telhados [manuscrito] : estudo de caso na Vila Caiçara de Picinguaba, Ubatuba-SP / Guilherme Gandra Franco. – 2021.

97 f., enc.: il. (principalmente color.)

Orientador: André Luiz Fonseca Naime.

Coorientadora: Sónia Maria Carvalho Ribeiro.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Cartografia, 2021.

Inclui bibliografia.

Inclui anexo.

1. Modelagem de dados – Aspectos ambientais – Teses. 2. Geração de energia fotovoltaica – Ubatuba (SP) – Teses. 3. Aeronave não tripulada – Ubatuba (SP) – Teses. 4. Sistemas de informação geográfica – Teses. I. Naime, André Luiz Fonseca. II. Carvalho-Ribeiro, Sónia Maria. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Departamento de Cartografia. IV. Título.

CDU: 911.2:519.6(815.6)

Ficha catalográfica elaborada por Graciane Aparecida de Paula – CRB6 3404



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ANÁLISE E MODELAGEM DE SISTEMAS AMBIENTAIS

### FOLHA DE APROVAÇÃO

**Modelagem tridimensional com o algoritmo *Structure from Moon (SfM)* para análise do potencial de geração de energia fotovoltaica em telhados: Estudo de caso na Vila Caiçara de Picinguaba, Ubatuba-SP**

**GUILHERME GANDRA FRANCO**

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ANÁLISE E MODELAGEM DE SISTEMAS AMBIENTAIS, como requisito para obtenção do grau de Mestre em ANÁLISE E MODELAGEM DE SISTEMAS AMBIENTAIS, área de concentração ANÁLISE, MODELAGEM E GESTÃO DE SISTEMAS AMBIENTAIS.

Dr. André Luiz Fonseca Naime - Orientador  
IBAMA

Dr. Eduardo Cou nho de Paula  
EE/UFMG

Dr. Bráulio Magalhães Fonseca  
IGC/UFMG

Me. Rafael Lemieszek Pinheiro  
SMPU/PBH

Belo Horizonte, 29 de março de 2021.



Documento assinado eletronicamente por **Rafael Lemieszek Pinheiro, Usuário Externo**, em 29/03/2021, às 17:55, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **André Luiz Fonseca Naime, Usuário Externo**, em 29/03/2021, às 18:22, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Eduardo Cou nho de Paula, Professor do Magistério Superior**, em 30/03/2021, às 17:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Braulio Magalhaes Fonseca, Subchefe de departamento**, em 30/03/2021, às 18:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufmg.br/sei/controlador\\_externo.php?](https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0)



[acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0631267** e o código CRC **04E4A27E**.

## RECONHECIMENTOS

O sol essencialmente é aquele que através de sua energia, nos traz calor, vida, rege inúmeras forças físicas e reações químicas no planeta Terra. Se Lennon e McCartney já veneravam o Rei Sol numa canção do Abbey Road, desfruto deste espaço para agradecer todos os meus sóis que de alguma maneira contribuíram para que esse trabalho fosse realizado.

Inicialmente devo toda gratidão à minha mãe Nadir, pelo amor incondicional e pela incansável batalha em mostrar o valor dos estudos. Ao meu pai Albino pelos exemplos de ética e esforço contínuo que se refletiram aqui. À Camila, verdadeira companheira para todas as horas, que colocou a mão na massa comigo para construir este trabalho desde a coleta de pontos no GNSS até a revisão da escrita. Aos meus orientadores André Luiz Fonseca Naime e Sônia Maria Carvalho Ribeiro, que me conduziram nesta jornada. A todos os colaboradores do PPAMSA, em especial ao Professor Bráulio Magalhães Fonseca que abriu as portas para que eu pudesse me aprofundar no universo acadêmico e Cora Alvarenga pela dedicação na condução da secretaria do programa.

Aos meus colegas de curso devo todo reconhecimento, em especial, Daniel Henrique Carneiro Salim, pelo apoio nas minhas inúmeras dúvidas sobre dimensionamento solar. Aos colegas do Geoteclab que me receberam de braços abertos. Pedro Henrique Figueiredo, espero que este estudo seja uma semente para plantarmos em várias outras cidades. Ao Professor Eduardo Coutinho de Paula por promover de maneira elucidativa o conhecimento sobre energias renováveis. Ao Professor Rafael Lemieszek Pinheiro pelos esforços na busca por tecnologias aplicadas ao espaço urbano. Ao meu irmão Victor, cunhada Ana Paula e em especial Bia, que através de vídeo chamadas pôde alegrar meus dias de estudo na quarentena. Ao Hugo Pontes, amigos, familiares e à Lígia, Joana, Lalá e Malala pela companhia nos momentos dessa escrita.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) por viabilizar esta pesquisa.

*“A man provided with paper, pencil, and rubber, and subject to strict discipline, is in effect a universal machine”.*

Alan Turing

## RESUMO GERAL

A conversão da matriz elétrica mundial para fontes renováveis tem se destacado nas últimas décadas como uma saída segura para que as nações – principalmente aquelas que buscam consonância com o sétimo Objetivo de Desenvolvimento Sustentável da Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas – passem a depender menos de fontes poluidoras e esgotáveis. Neste contexto, destaca-se a geração fotovoltaica, que a partir da luz solar, recurso gratuito e constante, é capaz de fornecer energia a baixo custo em função dos avanços tecnológicos obtidos nas últimas décadas. Apesar do Brasil possuir 62% da sua matriz no modal hidroelétrico, classificado como renovável, as recentes variações no balanço hídrico colocaram em xeque a capacidade das concessionárias distribuírem energia elétrica para o usuário, o que acarretou o acréscimo de tarifas de consumo. Associadas as dimensões continentais às altas taxas de irradiação solar ao longo do ano, o Brasil se torna palco de uma favorável conversão para este método. De forma a incentivar o emprego da energia fotovoltaica no país, este estudo busca fornecer um conjunto de ferramentas baseadas em tecnologias de mapeamento de baixo custo e modelagem tridimensional em ambiente computacional para detectar o potencial individual de telhados em edificações aptas a produzirem sua própria energia.

O foco do trabalho é, a partir do algoritmo de visão computacional *Structure from Motion* (SfM), modelar a superfície do terreno da vila caiçara Picinguaba, em Ubatuba-SP, através de imagens aéreas capturadas por drones, e submetê-las a algoritmos de irradiação solar contidos no software ArcGIS. A qualidade posicional da maquete tridimensional foi checada a partir de técnicas de topografia obtidas por GNSS de alta precisão e estações totais. Os resultados encontrados asseguram que a metodologia é viável para ser aplicada e substitui mapeamentos mais onerosos, como o subsidiado por laser embarcado em aeronaves pilotadas (LIDAR).

As implicações práticas mostram que o estudo fotovoltaico deve ser desenvolvido em escalas mais detalhadas de mapeamento, como a abordada na proposta, principalmente em função dos obstáculos naturais e físicos que a luz solar encontra até a superfície dos telhados. Algumas plataformas gratuitas na web já fornecem dados geolocalizados de irradiação solar, mas por envolverem pequenas escalas de mapeamento, não consideram estes elementos nos cálculos e com isso,

podem levar a erros graves de dimensionamento das usinas microgeradoras, causando prejuízos ao consumidor.

A pesquisa destaca-se como sugestão de uma nova metodologia de mapeamento para potencial solar, passível de ser replicada em qualquer recorte urbano, que outrora era comumente desenvolvida somente em espaços urbanizados restritos, por demandar um alto investimento na coleta destes dados. Como mecanismo de divulgação para a sociedade local, também faz parte do estudo a publicação de todo o conteúdo analisado em um mapa interativo hospedado em uma Plataforma web de livre acesso, onde o usuário poderá consultar o potencial de irradiação solar anual de qualquer imóvel da vila.

**Palavras-chave:** Visão computacional, Energia fotovoltaica, Sistema de informação geográfico, Drone.

## ABSTRACT

The conversion of the world electrical matrix to renewable sources has stood out in recent decades as a safe way for nations – especially those that seek to comply with the seventh Sustainable Development Goal of the United Nations' 2030 Agenda – to become less dependent of polluting and exhaustible resources. In this context, photovoltaic generation stands out, which from sunlight, a free and constant resource, is able to supply energy at low cost due to the technological advances obtained in the last decades. Although Brazil has 62% of its matrix in the hydroelectric modal, classified as renewable, the recent variations in the water balance have put in check the capacity of the concessionaires to distribute electricity to the user, which has resulted in the increase of consumption tariffs. The continental dimensions associated with high rates of solar irradiation throughout the year make a conversion to this method favorable in Brazil. In order to encourage the use of photovoltaic energy in the country, this study seeks to provide a set of tools based on low-cost mapping technologies and three-dimensional modeling in a computational environment to detect the individual potential of roofs in buildings able to produce their own energy.

The focus of the work is to model the terrain surface of Picinguaba village, in Ubatuba-SP, using the Structure from Motion (SfM) computer vision algorithm with aerial images captured by drones, and to submit them to processes of solar radiation contained in the ArcGIS software. The positional quality of the three-dimensional model was checked using topography techniques obtained by high-precision GNSS and total stations. The results found ensure that the method is feasible to be applied and replaces more expensive mappings, such as the one subsidized by laser embedded in piloted aircraft (LIDAR).

The practical implications show that the photovoltaic study must be developed in more detailed scales of mapping, such as the one addressed in the proposal, mainly due to the natural and physical obstacles that sunlight encounters to the roof surfaces. Some free platforms on the web already provide geolocalized data on solar irradiation, but because they involve small mapping scales, they do not consider these elements in the calculations and, with this, they can lead to serious sizing errors of the microgenerator plants, causing losses to the consumer.

The research stands out as a suggestion for a new mapping method for solar potential, able to be replicated in any urban area, which was once developed only in restricted urbanized spaces, as it required a high investment in the collection of this data. As a dissemination mechanism for the local society, the study also includes the publication of all of the analyzed content in an interactive map hosted on a freely accessible web platform, where the user will be able to consult the potential of annual solar radiation of any property in the village.

**Keywords:** Structure from Motion, Sunroof, GIS.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.1:</b> Média anual de irradiação global horizontal.....	15
<b>Figura 1.2:</b> Consulta de dados de irradiação incidida sobre edificação na Royal Street, na cidade de Perth.....	19
<b>Figura 1.3:</b> Resultados do desempenho de geração de energia PV da poligonal desenhada no telhado de um edifício na Royal Street, na cidade de Perth.....	20
<b>Figura 1.4:</b> Consulta de dados de irradiação sobre edificação no bairro da Urca, na cidade do Rio de Janeiro.....	20
<b>Figura 1.5:</b> Imagem aérea da vila de Picinguaba, Ubatuba.....	22
<b>Figura 2.1:</b> Vista aérea de Paris.....	27
<b>Figura 2.2:</b> Segmentos e comprimento das ondas eletromagnéticas.....	30
<b>Figura 2.3:</b> Relação dos componentes da câmera com a escala e altura de voo.....	31
<b>Figura 2.4:</b> Diferentes valores de GSD.....	32
<b>Figura 2.5 A:</b> Shutter, Abertura e ISO na fotogrametria por drones.....	33
<b>Figura 2.5 B:</b> ISO na fotogrametria por drones.....	34
<b>Figura 2.6:</b> Esquema de sobreposição longitudinal e lateral da aerofotogrametria.....	35
<b>Figura 2.7:</b> Nuvem de pontos lidar no software Global Mapper v19.0.....	37
<b>Figura 3.1:</b> Modelo de Ullman.....	42
<b>Figura 3.2:</b> Modelo lógico do SfM.....	43
<b>Figura 3.3:</b> Identificação dos <i>keypoints</i> .....	45
<b>Figura 3.4:</b> Comparativo do Lidar versus SfM.....	48
<b>Figura 3.5:</b> Comparativo de voo com altitude fixa (esquerda) com altitude relativa ao solo (direita).....	49
<b>Figura 4.1:</b> Módulos fotovoltaicos de Charles Fritts instalados num telhado de edifício em Nova Iorque.....	53
<b>Figura 4.2:</b> Terra à noite.....	55
<b>Figura 4.3:</b> Esquema de visada 360° do <i>hemispherical viewshed (fisheye)</i> para definição da linha do horizonte.....	57
<b>Figura 4.4:</b> Sunmap e combinação do resultado obtido no <i>Hemispherical viewshed</i> de um ponto na latitude 45°S.....	58
<b>Figura 4.5:</b> Modelo <i>Skymap</i> e combinação do resultado obtido no <i>Hemispherical viewshed</i> .....	59

<b>Figura 5.1:</b> Fluxograma do projeto.....	64
<b>Figura 5.2:</b> Marcação dos pontos de controle. Esquerda, artificial implementado com cal e direita, geometria existente (piso de cerâmica) .....	66
<b>Figura 5.3:</b> Distribuição dos pontos de controle em Picinguaba.....	67
<b>Figura 5.4:</b> Ponto de instalação da estação sem prisma.....	68
<b>Figura 5.5:</b> Mapa de localização dos pontos coletados a partir da irradiação da estação total.....	69
<b>Figura 5.6:</b> Variação do gradiente de altitude de voo conforme o MDT da área de Picinguaba.....	70
<b>Figura 5.7:</b> Fluxograma do processamento das ortofotos no Agisoft Metashape PRO.....	70
<b>Figura 5.8:</b> Telhados restituídos no ArcGIS PRO.....	72
<b>Figura 5.9:</b> Estrutura lógica do modelo solar.....	73
<b>Figura 5.10:</b> Mapa de aspecto.....	74
<b>Figura 5.11:</b> Mapa da matriz de irradiação acumulada no ano de 2020.....	77
<b>Figura 5.12:</b> Mapa da matriz de irradiação acumulada no mês de junho, solstício de inverno de 2020.....	78
<b>Figura 5.13:</b> Mapa da matriz de irradiação acumulada no mês de dezembro, solstício de verão de 2020.....	79
<b>Figura 5.14:</b> Dados publicados no Google Earth PRO.....	80
<b>Figura 5.15:</b> Identificação do potencial de irradiação anual detectada.....	81
<b>Figura 6.1:</b> Resumo da acurácia posicional dos pontos testados.....	82
<b>Figura 6.2:</b> Distorção observada nos telhados.....	83
<b>Figura 6.3:</b> Parâmetros de orientação exterior.....	85
<b>Figura 6.4:</b> Influência do sombreamento da copa das árvores.....	86
<b>Figura 6.5:</b> Influência do sombreamento de outras edificações.....	87
<b>Figura 6.6:</b> Imagem aérea de Fujisawa.....	88

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela.1.1:</b> Matriz elétrica brasileira até o mês 12/2020.....	17
<b>Tabela 1.2:</b> Potencial instalado PV no ano de 2019.....	18
<b>Tabela 2.1:</b> Parâmetros de erros admissíveis no PEC-PCD.....	36
<b>Tabela 5.1:</b> Quantitativo final dos dados gerados.....	71

## LISTA DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 3.1:</b> Bibliometria do tema fotogrametria associada com Structure from Motion na plataforma <i>Scopus</i> .....	47
<b>Gráfico 6.1:</b> Erros em X e Y nos 45 pontos testados.....	84
<b>Gráfico 6.2:</b> Irradiação média anual de 2020 em Picinguaba.....	88
<b>Gráfico 6.3:</b> Correlação entre tamanho da área do telhado (X) e W produzidos no ano de 2020 (Y) .....	89

## LISTA DE SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CCD	<i>Charge-coupled Device</i>
CHESF	Companhia Hidroelétrica do São Francisco
DECEA	Departamento de Controle do Espaço Aéreo
EP	Erro Padrão
ET-CQDG	Especificações Técnicas de Controle de Qualidade em Dados Geoespaciais
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GSD	<i>Ground sampling distance</i>
HSP	Horas de Sol Pleno
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LIDAR	<i>Light Detection end Ranging</i>
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações do Brasil

MDS	Modelo Digital de Superfície
MDT	Modelo Digital de Terreno
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i>
MVS	<i>Multi-view Stereo</i>
PEC	Padrão de Exatidão Cartográfica
PEC-PCD	Padrão de Exatidão Cartográfica para Produtos Cartográficos Digitais
PV	Fotovoltaico
RANSAC	<i>Random Sample Consensus</i>
RBMC	Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo
RMS	<i>Root Mean Square</i>
RPAS	<i>Remotely Piloted Aircraft Systems</i>
SARPAS	Solicitação de Acesso de Aeronaves Remotamente Pilotadas
SfM	<i>Structure from Motion</i>
SIG	Sistema de Informação Geográfico
SITF	<i>Scale Invariant Feature Transform</i>
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
VANT	Veículos Aéreos Não Tripulados
VLOS	<i>Visual Line-Of-Sight</i>

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO GERAL .....</b>	<b>14</b>
1.1 A Matriz elétrica brasileira e energia fotovoltaica global.....	16
1.2 Os sistemas de consultas de dados solares .....	19
1.3 Sobre o local selecionado .....	21
1.4 Os caminhos e justificativas .....	23
1.5 Estrutura da pesquisa .....	24
1.6 Referências .....	24
<b>CAPÍTULO 2. A EVOLUÇÃO DA FOTOGRAMETRIA.....</b>	<b>27</b>
2.1 Luz, Câmera e Ação.....	29
2.2 A luz como modeladora de superfícies .....	37
2.3 Referências .....	38
<b>CAPÍTULO 3. <i>STRUCTURE FROM MOTION</i> – UMA BREVE NARRATIVA.....</b>	<b>41</b>
3.1 As limitações do SfM.....	47
3.2 Referências .....	50
<b>CAPÍTULO 4. A LUZ COMO FONTE DE ENERGIA .....</b>	<b>52</b>
4.1 A física e química na concepção da energia PV .....	54
4.2 A sistematização dos estudos solares .....	56
4.3 Referências .....	60
<b>CAPÍTULO 5. MATERIAIS, MÉTODOS, COLETA E PROCESSAMENTO DE DADOS.....</b>	<b>63</b>
5.1 Preparação da área de estudo.....	65
5.2 Coleta amostral das feições de telhados.....	67
5.3 Voo e processamento dos dados .....	69
5.4 Restituição.....	71
5.5 Geração do modelo solar .....	72
5.6 Publicação.....	80
<b>CAPÍTULO 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>82</b>
6.1 Modelo Digital de Superfície.....	82
6.2 Geração de energia fotovoltaica em Picinguaba .....	86
6.2.1 Valoração energética das edificações.....	89
6.3 Benefícios e limitações.....	91
<b>CAPÍTULO 7. CONSIDERAÇÕES .....</b>	<b>94</b>
<b>REFERÊNCIAS DOS CAPÍTULOS 5, 6 E 7.....</b>	<b>95</b>
<b>ANEXO.....</b>	<b>97</b>

## CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO GERAL

A visão computacional caminha lado a lado com o desenvolvimento de *hardware* e *software* na corrente evolução tecnológica humana, por meio da criação de algoritmos complexos aos quais competem à física e à matemática apresentar soluções científicas e de entretenimento para a sociedade. A ciência cartográfica, uma das mais antigas da civilização, embarcou nos significativos potenciais que esta parceria poderia ofertar. Uma delas foi no desenvolvimento das técnicas de mapeamento e imageamento de baixo custo com equipamentos remotamente pilotados (drone) que outrora eram economicamente inviáveis para algumas aplicações. A partir da popularização dos drones no mercado, iniciou-se uma corrida para a busca de soluções em escalas de mapeamento reduzidas, estimuladas por produtos com alta resolução espacial aptos a possibilitar a visualização dos dados matriciais compostos por centímetros quadrados, de modo que fosse possível trazer à tona o conceito da realidade virtual.

A escultura de Modelos Digitais de Superfície (MDS), que por décadas recebeu atenção dos maiores institutos de pesquisa do mundo, torna-se uma ferramenta acessível e compreensível. Ainda que os mecanismos que regem estes modelos possuam natureza de entendimento complexa, a maciça rede de colaboração e transferência de informações da atualidade possibilitou a formulação de um novo marco no mapeamento de dados cartográficos. Segundo Sousa (2017), neste momento a fotogrametria absorve uma nova roupagem e possibilita apresentar diferentes soluções de mapeamento até então fornecidas por sistemas de satélites, radar, escaneadores a laser (*Lidar*) ou por câmeras de grande formato embarcadas em aeronaves pilotadas.

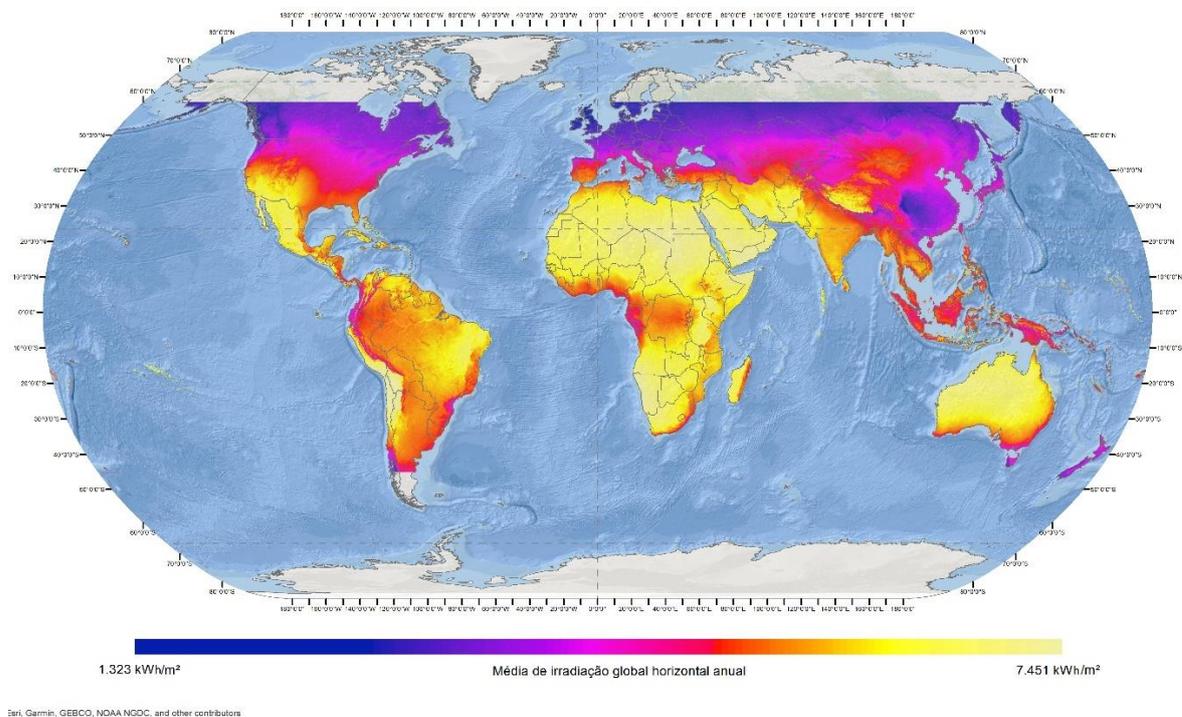
No que tange à geração de energia elétrica, observa-se uma harmonia entre o potencial dos MDS com um novo modal em expansão: a geração de energia fotovoltaica. Franco e Pinheiro (2020) avaliaram o algoritmo *Hemispherical Viewshed* contido no *software* ArcGIS na projeção de irradiações solares em ambientes tridimensionais e salientaram que a componente posição e geometria das formas estão contidas em todas as equações deste modelo. Isso traz à tona a necessidade de análises em maquetes digitais mais realistas, que consideram não somente a forma

dos edifícios, como também os efeitos de sombreamento de obstáculos naturais, como árvores e relevo no dimensionamento energético gerado nestas superfícies.

Também se tem observado que as crescentes discussões correlatas ao tema convergem na busca de energia de baixo custo e sem emissão direta de poluentes no intuito de contribuir para o aumento no bem-estar social e, concomitantemente, no desenvolvimento científico que busca a melhoria das dinâmicas socioeconômicas e ambientais em todo o planeta. Como parte da resolução 70/1 da Assembleia Geral das Nações Unidas, no ano de 2015 – em que se tratou de estabelecer uma meta para 2030 que garanta acesso à energia barata, confiável, sustentável e renovável para todos – diversos países têm buscado estas soluções para o aprimoramento das matrizes energéticas.

Segundo dados disponibilizados na plataforma *Solar GIS, 2020*, desenvolvida em parceria com o Banco Mundial, cujo objetivo principal é informar a partir de modelos solares de irradiação anual em kWh/m<sup>2</sup> nas latitudes 60°N e 50°S, de acordo com a figura 1.1, o Brasil, assim como diversos países em desenvolvimento, estão com produção de energia fotovoltaica aquém das suas reais potencialidades.

Figura.1.1 Média anual de irradiação global horizontal.



Fonte: Arquivo matricial *Longterm yearly average of global horizontal irradiation (1994 a 2018)* Global Solar Atlas, 2020. Organização: Autor, 2021.

## 1.1 A Matriz elétrica brasileira e energia fotovoltaica global

No Brasil, observa-se um grande destaque na capacidade geradora de energia solar em função da dimensão continental do território e latitudes que favorecem a incidência de luz durante todo o ano. No entanto, não há uma relevância do volume energético gerado, quando comparado às demais fontes presentes no país. Segundo o Sistema de Informações de Geração (SIGA), da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), em dezembro de 2020, o Brasil contara com 9.025 empreendimentos em operação, que totalizam 173,75 GW de potência instalada, das quais 1,79% (3,11 GW) são atribuídas à modalidade energia solar (tabela 1.1). Esse número é irrisório quando comparado aos 205,5 GW disponíveis no modal fotovoltaico (PV) na China, seguido pelo Japão com 61,8 GW e Estados Unidos com 60,5 GW de acordo com o relatório *Renewable capacity statistics 2020*, da *International Renewable Energy Agency (IRENA)* tabela 1.2.

Cabe ainda ressaltar que 83,17% o potencial PV instalado no mundo concentra-se nos dez maiores países produtores, cabendo aos demais 183 o montante remanescente. Países como China e Japão, que transitam em baixos e médios gradientes de irradiação horizontal, representam juntos 45% da produção de energia PV global. Isso denota que os investimentos em políticas de conversão das matrizes podem se destacar diante das condicionantes determinísticas físicas geográficas de uma nação.

Ainda que o Brasil se sobressaia pela principal fonte geradora de energia ser considerada limpa no que tange a emissão de gases poluentes, Coelho *et al.* (2016) reitera que as alterações no balanço hídrico assistidas nos últimos anos, principalmente na região Sudeste do Brasil, colocaram em xeque a capacidade das concessionárias distribuírem energia elétrica. Esse fato, conjugado às controversas estratégias políticas, acarretou o acréscimo de tarifas de consumo para o usuário doméstico. Tal fenômeno não ocorre nas tecnologias recentes de geração fotovoltaicas, uma vez que a fonte de luz emitida pelo sol, apesar da dinâmica e variação da cobertura de nuvens, não apresenta oscilações cíclicas como a água, e nela pode se evitar contingenciamentos como narrados na recente história da

economia brasileira – vide o “Apagão” – entre os anos 2001 e 2002<sup>1</sup> e as bandeiras tarifárias de 2015<sup>2</sup> até a presente data.

Tabela.1.1: Matriz elétrica brasileira até o mês 12/2020.

RÓTULOS DE LINHA	CAPACIDADE DE GERAÇÃO (kW)	% DA MATRIZ
<b>Biomassa</b>	<b>15.198.818,45</b>	8,75
Agroindustriais	11.717.431,20	
Biocombustíveis líquidos	4.670,40	
Floresta	3.289.513,05	
Resíduos animais	4.741,20	
Resíduos sólidos urbanos	182.462,60	
<b>Eólica</b>	<b>16.565.972,86</b>	9,53
Cinética do vento	16.565.972,86	
<b>Fóssil</b>	<b>27.622.009,34</b>	15,9
Carvão mineral	3.582.830,00	
Gás natural	14.952.838,79	
Outros Fósseis	165.970,00	
Petróleo	8.920.370,55	
<b>Hídrica</b>	<b>109.260.181,41</b>	62,88
Potencial hidráulico	109.260.151,41	
<b>Nuclear</b>	<b>1.990.000,00</b>	1,15
Urânio	1.990.000,00	
<b>Solar</b>	<b>3.113.946,25</b>	1,79
Radiação solar	3.113.946,25	
<b>TOTAL GERAL</b>	<b>173.750.928,31</b>	100

Fonte: Dados adaptados do Sistema de Informações de Geração ANEEL, 2020. Organização: Autor, 2021.

<sup>1</sup> Manchetes sobre o “Apagão” no jornal Correio Braziliense no ano de 2001. Fonte: <https://www.correio braziliense.com.br/app/noticia/brasil/2009/11/11/interna-brasil,154193/confira-materias-sobre-o-apagao-de-2001-publicadas-pelo-correio.shtml>

<sup>2</sup> Informativo sobre as Bandeiras Tarifárias. Agência Nacional de Energia Elétrica ANEEL. Fonte: <https://www.aneel.gov.br/bandeiras-tarifarias>

Tabela 1.2: Potencial fotovoltaico instalado no ano de 2019.

Localidade	Potencial instalado GW	Taxa de produção global (%)	Área total (km <sup>2</sup> )	Produção GW por km <sup>2</sup>
Mundo	580,159	-----	510.100.000	0,0011
China	205,072	35,35	9.597.000	0,0214
Japão	61,840	10,66	377.915	0,1636
Estados Unidos	60,540	10,44	9.834.000	0,0062
Alemanha	48,960	8,44	357.386	0,1370
Índia	34,831	6,00	3.287.590	0,0106
Itália	20,900	3,60	301.338	0,0694
Austrália	15,928	2,75	7.692.000	0,0021
Reino Unido	13,398	2,31	242.495	0,0553
França	10,562	1,82	643.801	0,0164
Coréia do Sul	10,505	1,81	100.210	0,1048
* Brasil	3,113	0,54	8.516.000	0,0004

Fonte: Dados de energia PV gerada adaptados do *Renewable Capacity Statistics* 2019. IRENA, 2020; dados PV no Brasil, ANEEL \*2020. Organização: Autor, 2021.

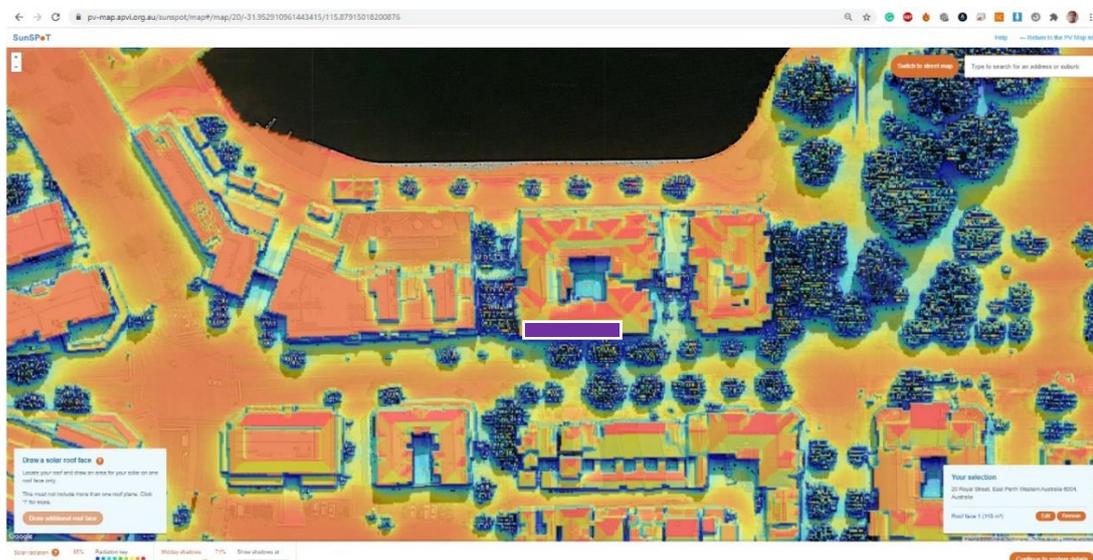
Como reflexo dos acometimentos no setor elétrico, podem ser observadas algumas ações conceituais. Em evidência, um projeto piloto alternativo da Companhia Hidroelétrica do São Francisco (CHESF) que busca por poupar a utilização de recursos hídricos energéticos, onde foi implantado um sistema híbrido no reservatório de Sobradinho, que consiste em 3.792 módulos fotovoltaicos flutuantes, com potência instalada de 1MWp. Tal iniciativa poderá incentivar medidas de conversão da matriz energética para reduzir o consumo do modal hídrico nos horários diurnos, em que a luz do sol atua na produção elétrica.

Dantas & Pompermayer (2018) afirmam que o cenário para esta conversão está muito favorável, uma vez que o decréscimo do valor de dólares americanos por Watts produzidos apresentados nas últimas quatro décadas foi de U\$79,67 para U\$0,36. Associado a isso, incentivos fiscais e legislativos figuram o mercado de energia no Brasil, como a Resolução Normativa 482, de abril de 2012, que autorizou a geração distribuída de energia fotovoltaica a partir da microgeração, ou seja, o consumidor passou a ser capaz de produzir sua própria energia e até pode comercializar o excedente gerado com as concessionárias, e isso contribuiu para melhorias na cadeia produtiva e de distribuição dos insumos deste sistema (BROSE *et.al.* 2020).

## 1.2 Os sistemas de consultas de dados solares

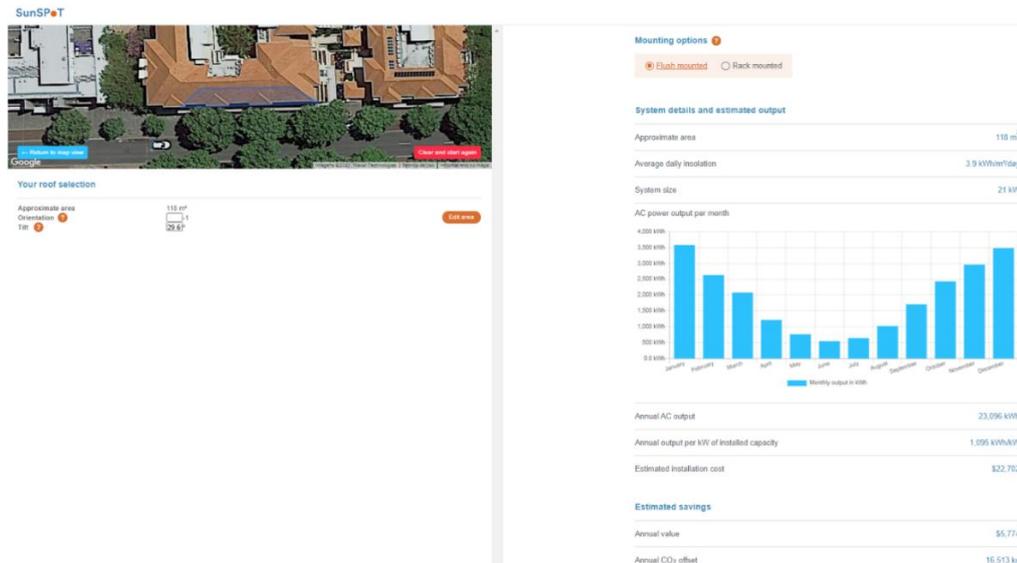
Visando a propagação de novos empreendimentos PV, algumas instituições vêm desenvolvendo ferramentas de consultas para que a sociedade possa ter o entendimento da capacidade produtiva fotovoltaica de determinados recortes espaciais. Estes sistemas consistem muitas vezes em plataformas digitais abertas, compostas por bases cartográficas hospedadas em ambiente *web*, como o SunSpot, da *Australian Renewable Energy Agency*, que disponibilizou em seu portal maquetes tridimensionais de 41 municípios do país. A plataforma embarca modelos de irradiação solar projetados sobre edificações em que o usuário pode restituir um polígono sobre uma superfície de interesse e obter o cálculo médio de energia PV produzida ao longo de um ano. Dessa forma, não há necessidade de o usuário instalar softwares especialistas, produzir ou minerar dados espaciais para tratar nestes ambientes – basta possuir conexão com internet.

Figura 1.2: Consulta de dados de irradiação incidida sobre edificação na Royal Street, na cidade de Perth.



Fonte: Australian PV Institute (APVI) Solar Map Website. SunSpot, 2020. <https://pv-map.apvi.org.au/>

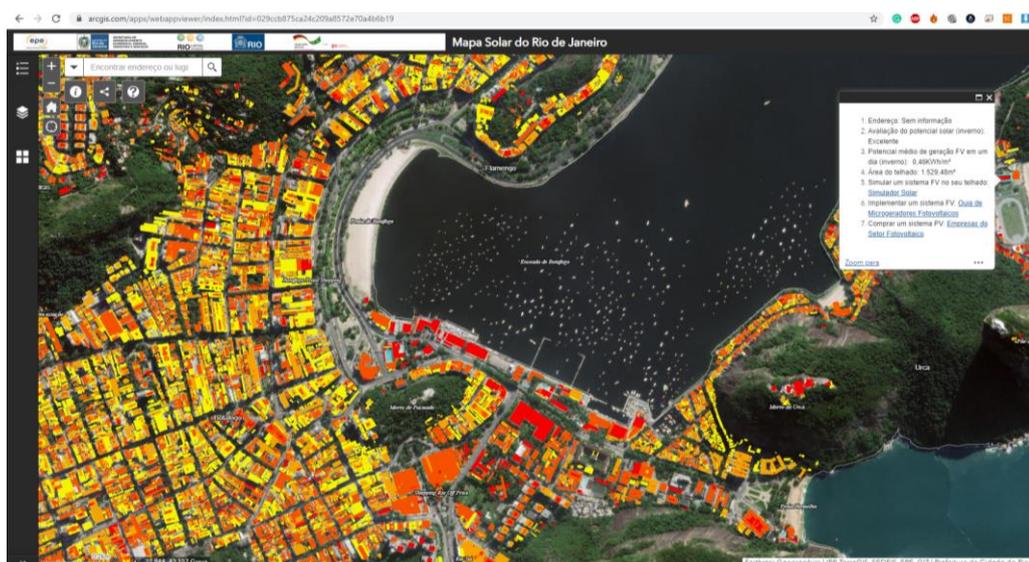
Figura 1.3: Resultados do desempenho de geração de energia PV da poligonal desenhada no telhado de um edifício na Royal Street, na cidade de Perth.



Fonte: Australian PV Institute (APVI) Solar Map Website. SunSpot, 2020. <https://pv-map.apvi.org.au/>

No Brasil, o Mapa Solar do Rio de Janeiro, lançado em 2020 a partir de uma parceria pública e privada, permite que o usuário possa consultar numa plataforma *webgis* a capacidade média total de radiação solar em kWh/m<sup>2</sup> em toda superfície dos telhados durante um ano.

Figura 1.4: Consulta de dados de irradiação sobre edificação no bairro da Urca, na cidade do Rio de Janeiro.



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2020.

<https://www.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=029ccb875ca24c209a8572e70a4b6b19>

Estas medidas aqui expostas são importantes exemplos voltados para a sociedade poder ter acesso a dados, que habitualmente possuem um trânsito exclusivo entre especialistas de áreas multidisciplinares, como climatologia, matemática, cartografia e computação. Também vai ao encontro de alguns conceitos das cidades inteligentes que as tornam capazes de colher, sistematizar e aplicar a informação a ela relacionada (PINHEIRO, 2016), e possibilita também a assertividade do dimensionamento de sistemas individuais de geração, que podem contribuir para a melhoria socioeconômica de muitas residências e empresas.

### **1.3 Sobre o local selecionado**

Picinguaba é um distrito localizado no município de Ubatuba, na região do Litoral Norte do estado de São Paulo, próximo à divisa com o Rio de Janeiro e, desde 1979, está inserido na unidade de conservação estadual Serra do Mar, detentora de restrições quanto ao uso e ocupação do solo, que restringe a supressão de mata nativa e ampliação de áreas edificáveis. A vila, que possuía características típicas de agricultura e pesca artesanal, passou a conviver com o aumento populacional e de visitantes, principalmente a partir da década de 1970, com a pavimentação da rodovia BR-101 (ÂNGELO, 1992). De acordo com o último censo do IBGE, em 2010, viviam em Picinguaba 318 habitantes, no entanto, a desatualização dos dados censitários e a não consideração da população flutuante que habita casas de veraneio fazem com o que esta estimativa apresente características de subdimensionamento.

Figura 1.5: Imagem aérea da vila de Picinguaba, Ubatuba.



Fonte: Autor, 2020.

Conforme entrevista realizada com moradores antigos, sua ocupação data de períodos pré-coloniais, por índios Tupinambás, que ao longo dos séculos perderam espaço para os portugueses e franceses que se instalaram na região. Vale salientar que a vila é mais antiga que a própria sede municipal de Ubatuba. Não há vias pavimentadas na vila e o acesso a muitas edificações se dá por escadarias e vielas, sempre envolvidos por muita umidade e vegetação típica do bioma Mata Atlântica. As águas oceânicas são cristalinas em tons esverdeados, com areia fina e poucas ondas, a variação do gradiente de elevação topográfica inicia-se no nível do mar e se estende até 280 metros.

Suas principais atividades econômicas giram em torno da pesca e serviços de turismo na praia local e nas ilhas próximas, em destaque a Ilha das Couves, cartão postal da cidade, estampada nos principais guias turísticos de praias do estado de São Paulo, que segundo a Fundação Florestal, responsável pela fiscalização ambiental do território, já chegou a receber dois mil visitantes por dia, e hoje limita a 177 pessoas simultâneas como alternativa de promover um turismo sustentável.

## 1.4 Os caminhos e justificativas

Seguindo o viés do incentivo de viabilizar o emprego do modal de energias renováveis em todo país, este estudo foi inspirado em algumas pesquisas já realizadas como Amarante *et al.* (2019), que avaliaram, a partir de Modelos Digitais de Superfície (MDS), o potencial de energia solar do município de Santa Bárbara, em Minas Gerais e Reginato e Julião (2019), que utilizaram dados de satélites para modelar o potencial eólico e solar das regiões do Alentejo e Agave, em Portugal, o que demonstra que mesmo com dados de escalas regionais, é possível obter resultados significativos e trazer à tona discussões relevantes no ponto de vista da exploração de energias renováveis.

Sob estas perspectivas de modelagem, o trabalho recriou estes estudos citados, com um acréscimo de elementos técnicos relevantes para sobressaltar o método aqui sugerido como um caminho viável na busca de soluções de novas fontes de energia, mediante verificação da qualidade dos MDS produzidos por drones no mapeamento urbano. Foram utilizados GNSS de alta precisão e amostras de pontos coletados por estação total a laser para a validação do MDS. Após a modelagem da irradiação solar sobre o MDS, também foi concebida uma plataforma gratuita de consulta em ambiente web, contendo a área mapeada, como as aqui apresentadas.

Uma das principais justificativas baseia-se no fato do vilarejo estar inserido em uma floresta do bioma Mata Atlântica, o que inviabiliza instalação de grandes usinas eólicas ou fotovoltaicas, tornando os telhados possível fonte provedora de energia. Quanto às características da distribuição de energia elétrica local, observa-se somente uma rede trifásica que acompanha a estrada de acesso e que sofre constantes variações na tensão, conforme a demanda no consumo. A solução aqui a ser apresentada poderá também instigar a população a buscar essas melhorias técnicas do sistema energético local, com a introdução de uma nova fonte – a solar – na rede existente e desonerar custos com tarifas energéticas, que poderão ser convertidos em ganhos na qualidade de vida local, além de contribuir para o meio ambiente, com a utilização de energia renovável limpa.

## 1.5 Estrutura da pesquisa

O estudo inicia-se a partir de uma breve narrativa histórica da aerofotogrametria até a revolução dos instrumentos digitais, que possibilitou o concomitante desenvolvimento da cartografia (Capítulo 2). Alguns conceitos como resolução espacial, escalas de voo, processos de acurácia posicional também são tratados neste capítulo.

Em seguida, busca-se uma breve revisão sobre o *Structure from Motion* (SfM) que se consagrou como um dos principais algoritmos de visão computacional utilizados na fotogrametria moderna (Capítulo 3). Nele também são expostas algumas de suas limitações, bem como seu potencial para a proposta apresentada.

No Capítulo 4, a geração da energia elétrica a partir da luz solar é explicada por meio dos conceitos básicos da física e posteriormente é introduzida para o universo computacional dos Sistemas de Informação Geográficos (SIG) que a partir de operações complexas, são capazes de estimar o potencial irradiado em superfícies mapeadas.

Após a revisão dos principais conceitos que envolvem o trabalho, o Capítulo 5 discorre sobre o conjunto de métodos de mapeamentos e testagens na área selecionada para um dimensionamento do potencial de energia fotovoltaica nos telhados da área urbanizada de Picinguaba.

Por fim, os Capítulos 6 e 7 avaliam os parâmetros encontrados e discutem sobre alguns possíveis ganhos numa eventual conversão da matriz energética para a fotovoltaica, bem como nos benefícios obtidos com o método de visão computacional.

## 1.6 Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. – **Sistema de Informações de Geração da ANEEL SIGA**. Disponível em: <<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjojNjc4OGYyYjQtYWM2ZC00YjllLWJlYmEtYzdkNTQ1MTc1NjM2liwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOiR9>>. Data de acesso: 14/12/2020.

ÂNGELO, S. – Picinguaba: Três décadas numa vila de pescadores do litoral norte de São Paulo. **Boletim Paulista de Geografia- BPG** v.69, 1992. Disponível em: <<https://agb.org.br/publicacoes/index.php/boletim-paulista/article/view/933/0>>. Data de acesso: 01/12/2020

AUSTRALIAN PV INSTITUTE (APVI) - **Solar Map**. Australian Renewable Energy Agency, 2020, Disponível em: <<https://pv-map.apvi.org.au/sunspot/map#/>>. Data de acesso: 10/12/2020.

BROSE, M. E; ETGES, V. E; KARNOOP, E; ZANCHI, V. Inovação Social da Geração Distribuída de Energia.: O Caso de Santa Cruz do Sul, RS. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental** v. 9, n. 3, 2020. Disponível em: <[http://www.portaldeperiodicos.unisul.br/index.php/gestao\\_ambiental/article/view/8344](http://www.portaldeperiodicos.unisul.br/index.php/gestao_ambiental/article/view/8344)>. Data de acesso: 05/12/2020.

COLEHO C. A. S; CARDOSO D. H. F.; FIRPO M. A. F. A seca de 2013 a 2015 na região sudeste do Brasil. **Boletim Climanálise**, INPE. São José dos Campos, 2015. Disponível em: <<http://climanalise.cptec.inpe.br/~rcliman/revista/pdf/30anos/Coelhoetal.pdf>>. Data de acesso: 05/12/2020.

COMPANHIA HIDRO ELÉTRICA DO SÃO FRANCISCO. **Chesf energiza Usina Solar Flutuante**. Matéria publicada no portal, dia 04/08/2019. Disponível em: <[https://www.chesf.gov.br/layouts/15/chesf\\_noticias\\_farm/noticia.aspx?idnoticia=373](https://www.chesf.gov.br/layouts/15/chesf_noticias_farm/noticia.aspx?idnoticia=373)>. Data de acesso: 01/05/2020.

DANTAS S. G. POMPERMAYER F. M. - **Viabilidade Econômica de Sistemas Fotovoltaicos no Brasil e Possíveis Efeitos no Setor Elétrico**. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada IPEA, 2018. Disponível em: <[https://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/TDs/td\\_2388.pdf](https://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/TDs/td_2388.pdf)>. Data de acesso: 12/11/2020.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – **Mapa Solar do Rio de Janeiro**. EPE, 2020. Disponível em: <<https://www.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=029ccb875ca24c209a8572e70a4b6b>>19>. Data de acesso:14/12/2020.

FRANCO G. G. e PINHEIRO R. L. - Estudo comparativo das estimativas de energia fotovoltaica gerada sobre superfícies tridimensionais em ambiente SIG e das informadas pela plataforma Sundata. **Brazilian Journal of Development**. v. 6(12), 2020 Disponível em: <<https://www.brazilianjournals.com/index.php/BRJD/article/view/20830/16627>>. Data de acesso: 09/12/2020

FUNDAÇÃO FLORESTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - **Fundação Florestal aprimora regras para turismo na Ilha das Couves**, em Ubatuba. Publicada no portal em 01/11/2020. Disponível em: <<https://www.saopaulo.sp.gov.br/ultimas-noticias/fundacao-florestal-aprimora-regras-para-turismo-na-ilha-das-couves-em-ubatuba/>>. Data de acesso: 10/12/2020

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA) - **Renewable Capacity Statistics 2020**. Disponível em: <https://www.irena.org/publications/2020/Mar/Renewable-Capacity-Statistics-2020>.  
Data de acesso: 10/12/2020.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - **Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012**. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>. Data de acesso: 15/12/2020.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS – ONU – **Agenda 2030**. Disponível em: <http://www.agenda2030.com.br/>. Data de acesso: 10/12/2020.

PINHEIRO R. L. - **Por uma cidade aberta**. 2016. 208p. Dissertação de Mestrado da Escola de Arquitetura UFMG, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/MMMD-AKHPLC>. Data de acesso: 18/12/2020.

REGINATO, V. S.; JULIÃO, R. P. Geographic Modelling of Wind and Solar Energy Potential. **Bulletin of Geodetic Sciences**, 25(3): 2019. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/bcq/article/view/71712/40355>. Data de acesso: 08/05/2020.

SOLARGIS. - **Longterm yearly average of global horizontal irradiation** - Global Solar Atlas, 2019. Disponível em: <https://solargis.com/maps-and-gis-data/overview>.  
Data de acesso: 20/11/2020.

SOUSA H. L. - **Visão computacional na fotogrametria: Uma avaliação sobre os modernos recursos que podem ser utilizados na otimização do processamento de imagens obtidas em VANT**. Instituto Militar de Engenharia, IV Simpósio Brasileiro de Geomática, 2017. Disponível em: [http://docs.fct.unesp.br/departamentos/cartografia/eventos/2017\\_IV\\_SBG/artigos/2017\\_SBG\\_CTIG\\_paper\\_95.pdf](http://docs.fct.unesp.br/departamentos/cartografia/eventos/2017_IV_SBG/artigos/2017_SBG_CTIG_paper_95.pdf). Data de acesso: 17/10/2020.

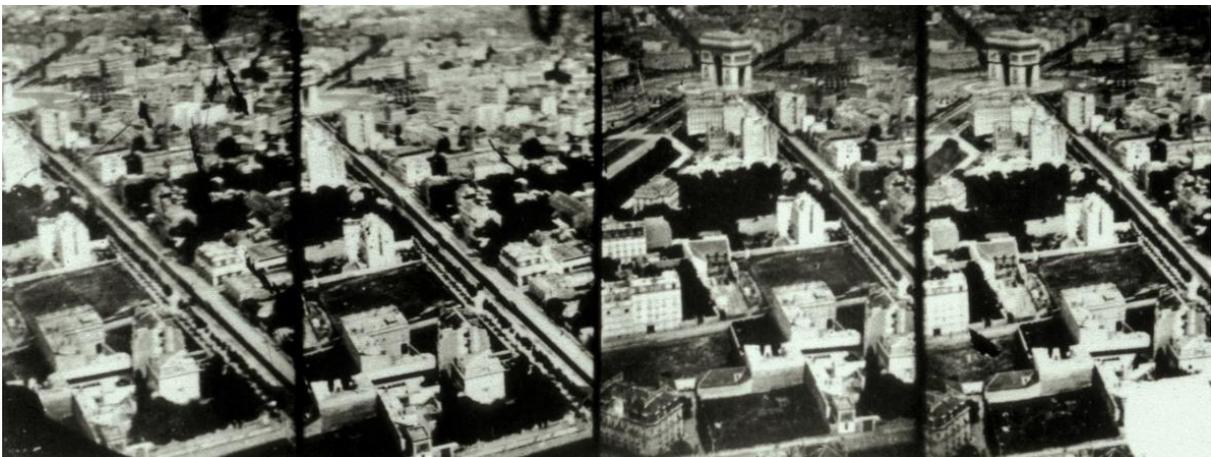
## CAPÍTULO 2. A EVOLUÇÃO DA FOTOGRAMETRIA

Associada às ciências cartográficas, a Fotogrametria, em suma, é um conjunto de técnicas para obtenção de métricas e identificação de feições a partir das cenas registradas por câmeras fotográficas (ANDRADE, 2003). Tal tecnologia foi iniciada em 1727, por Johann Schulze, que ao expor sais de prata à luz notou seu escurecimento. Este experimento se desdobrou em uma variedade de ensaios e no ano 1837, Joseph Nicéphore Niépce foi capaz de registrar uma imagem sobre uma chapa metálica, iniciando assim a era da fotografia (WITTEN, 2016).

Obviamente a origem e evolução da fotogrametria está intimamente relacionada com a dos elementos chave para sua qualificação – a óptica e sensores – que ao serem embarcados em veículos aéreos passam a constituir a Aerofotogrametria.

É um ledor engano vincular a Aerofotogrametria com as aeronaves, que no início do século XX ganharam os céus do mundo a partir das invenções de Santos Dumont (14 Bis) e irmãos Wright (*Flyer*). De acordo com Eusenbeiß (2009), em 1858 o francês Gaspard Tournachon, popularmente conhecido como Nadar, realizou em Paris aquele que seria o primeiro registro aéreo da história. Na ocasião, as capturas só poderiam ser subsidiadas por pipas e balões, dessa forma, Nadar introduziu à sociedade a técnica que no decorrer do século seguinte passaria a ser reconhecida como Sensoriamento Remoto.

Figura 2.1: Vista aérea de Paris.



Fonte: Nadar, 1858. BAUMANN P.R. - History of Remote Sensing, Aerial Photography

O experimento narrado desencadeou uma série de sequentes melhorias – muitas delas herdadas dos períodos de guerras mundiais – dentre as quais, diversas tornaram-se habituais a quaisquer pesquisas que abordam análises espaciais das últimas cinco décadas. Sensores orbitais de imageamento ou posicionais, radares, transferência de dados móveis, escaneamento a laser, veículos aéreos não tripulados, entre outros, compõem o rol de equipamentos que a aerofotogrametria moderna abarcou nos últimos anos. Ao ser concatenada a eletrônica e computação, impulsionou suas aplicações no âmbito da cartografia (KONECNY, 2014).

Ressalta-se que a óptica, seu componente principal, quando também submetida à revolução digital, torna-se um marco para acentuação das ciências cartográficas. Mesmo que datada da década de 70 (Digital Kamera Museum, 2020), a fotografia digital também solicitou demandas na evolução e popularização dos computadores, para que no início do século XXI, pudesse se desenvolver de forma plena. Seu sucesso consolidou-se ao ponto do estado da arte em que transcendeu as mentes céticas de que um dia câmeras compactas, que cabem na palma da mão, poderiam registrar com nitidez as crateras da lua.

Como consequência natural, a tecnologia de resistência dos materiais caminhou com os avanços descritos acima, com ligas de plástico, metal ou fibras cada vez mais leves e robustas. Por meio da sua fusão aos modernos sistemas eletrônicos, ópticos, de comunicação e navegação, foram desenvolvidos os Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT). A terminologia é oriunda da abreviação em inglês UAV – *Unmanned Aerial Vehicle*, que também é designada como RPAS – *Remotely Piloted Aircraft Systems*, ou tal-qualmente *Drones*.

Os *Drones* se tornaram populares a partir da massificação do seu processo de produção industrial, que visou a priori atender um segmento de mercado atento à fotografia, filmagem e lazer, principalmente com a fabricante chinesa DJI, que em 2013 lançou o primeiro modelo da série Phantom, que viria a se tornar um dos mais populares do mundo (ALKOBI, 2019). Embora a indústria tenha observado potencial demanda para este novo modal de mercado naquela ocasião, no ano de 2008 já ocorrera em Orlando, nos Estados Unidos, o *International Symposium on Unmanned Aerial Vehicles*, (VALAVANIS *et. al* 2008), contendo uma relevante coletânea de pesquisa sobre algoritmos de visão computacional, modelagem de superfícies, ortomosaicos e tendências futuras no uso dos *Drones*. A partir deste período, observou-se uma rápida ascensão de pesquisas aplicadas nos campos do meio

ambiente, arqueologia, engenharias, planejamento urbano, defesa, mineração, dentre outras, com o intuito de atender as mais distintas demandas da sociedade.

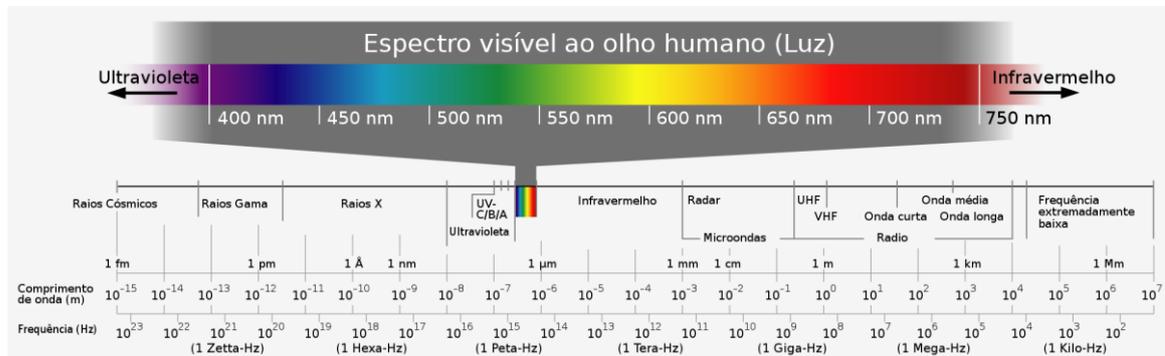
## 2.1 Luz, Câmera e Ação

Durante os anos de 1660, um dos cientistas mais influentes da humanidade decompôs a luz branca através de um prisma cristalino e formulou a Teoria das Cores. Isaac Newton concluiu na ocasião que a luz solar era composta por diversas cores, que no seu entendimento consistiam em partículas capazes de serem separadas. Segundo Johnson (2010), tal avaliação sobreviveu por poucos anos, até que Christiaan Huygens, em 1678 sugeriu que as cores eram diferentes ondas eletromagnéticas, confirmadas por James Clerk Maxwell, por meio de equações complexas dois séculos depois de Newton.

*“A velocidade é tão próxima à da luz que parece termos fortes razões para concluir que a própria luz (incluindo calor radiante e outras radiações) é uma perturbação eletromagnética na forma de ondas, propagado através do campo eletromagnético de acordo com as leis eletromagnéticas.” (MAXWELL, 1865)*

Segundo o autor, o estudo de Maxwell serviu como subsídio para que Albert Einstein desenvolvesse a teoria do Efeito Fotoelétrico, publicado em 1905 com o tema: "Sobre um ponto de vista heurístico relativo à produção e transformação da luz", que lhe rendeu seu único prêmio Nobel, no ano de 1921, que consistia na avaliação energética dos fótons – partícula de energia na forma de radiação eletromagnética. Nos dias de hoje sabe-se até o comprimento e em quais faixas do espectro essas ondas ocupam (figura 2.2), às quais competem às células do olho humano absorverem e identificarem os fótons com 400 nm até 700nm.

Figura 2.2: Segmentos e comprimento das ondas eletromagnéticas.



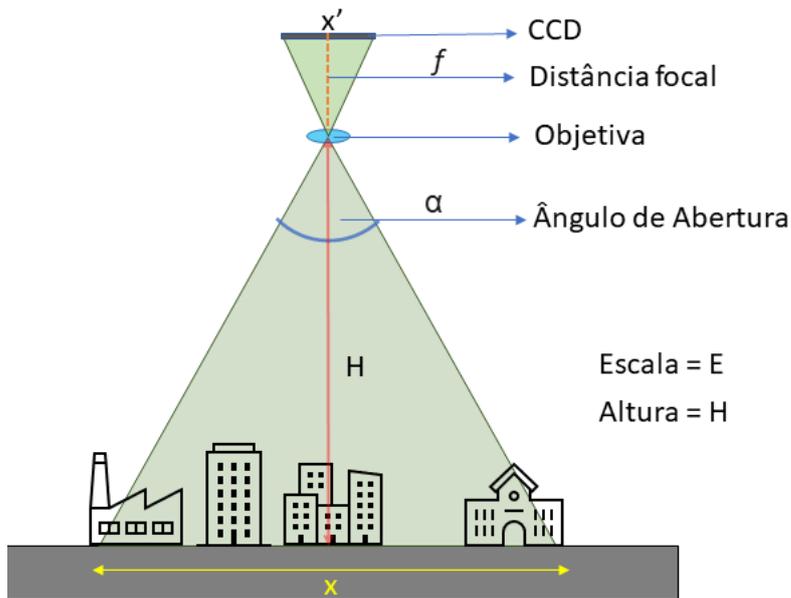
Fonte: Horst Frank, Wikimedia Commons CC BY-SA 4.0. 2020

Inspirados na morfologia biológica do olho, surgem as câmeras fotográficas, que a partir da energia eletromagnética capturada por lentes e projetada nos seus respectivos sensores, passou a representar analogicamente e digitalmente o mundo em forma de imagens. Ressalta-se que a tecnologia atual permite registros de espectros não visíveis a olho nu, como as câmeras termais, muito utilizadas na indústria de inspeção e segurança, ou infravermelhas, nas aplicações agrícolas.

Independentemente da concepção digital ou analógica, o objeto câmera em si, possui a mesma estrutura física composta por: Corpo, responsável por armazenar seus componentes internos; Objetiva, cuja função é convergir os raios luminosos de um objeto para um plano; Diafragma, que controla a quantidade de luz que penetrará no sistema; Obturador, que controla o tempo de exposição do sistema à luz e por fim, o sensor que projeta no filme nas analógicas ou no Dispositivo de Carga Acoplada (CCD), das câmeras digitais. É natural que os estudos atuais sobre o assunto vertem em sua maioria para a aerofotogrametria digital, assim como este, uma vez que os ganhos em custos e rapidez são inigualáveis às tecnologias antecessoras.

É importante salientar que alguns elementos da fotogrametria, devem ser avaliados com extremo rigor, para que a boa representatividade do alvo mapeado na superfície possa ser cumprida. Uma das principais é a escala de voo, que é definida pela relação entre distância focal e distância do objeto e a abertura da câmera com o tamanho do sensor (Figura 2.3).

Figura 2.3: Relação dos componentes da câmera com a escala e altura de voo.



Onde:

$$E = \frac{x'}{X} = \frac{f}{H}$$

$$H = \frac{f}{E}$$

Fonte: Autor, 2021. Adaptado de Andrade 2003 e Kraus 2004

Esta relação influencia diretamente nos custos do projeto, uma vez que quanto mais próximo do solo a aeronave sobrevoa ( $H$ ), menor o  $X$ , ou seja, demandaria mais fotos para que a área pudesse ser coberta pela aerofotogrametria. No entanto, quanto mais próximo do alvo, melhor sua resolução espacial - *Ground sampling distance* (GSD) - onde o *pixel* corresponde a menor partícula de uma matriz (Figura 2.4).

Figura 2.4: Diferentes valores de GSD



Fonte: Autor, 2021.

Deve-se também observar os três pilares da fotografia para a concepção da fotogrametria. A abertura do diafragma, responsável pelo fluxo de luz que penetra no interior da câmera é definida por uma nomenclatura própria – F/Stop. Segundo Figueiredo (2018) essa escala é fornecida nos intervalos  $f/1$ ,  $f/1.4$ ,  $f/2$ ,  $f/2.8$ ,  $f/4$ ,  $f/5.6$ ,  $f/8$ ,  $f/11$ ,  $f/16$ ,  $f/22$ ,  $f/32$ , de forma que os menores valores representam menores aberturas. A maioria das câmeras digitais utilizadas na aerofotogrametria já possuem mecanismos de ajustes automáticos conforme a luminosidade do ambiente, mas o autor destaca que as faixas  $f/5.6$  a  $f/2.8$  como as mais aderentes para levantamentos subsidiados por drones. Andrade (2003) explica que quanto menor o diâmetro do diafragma, menor será o ângulo de abertura e que esta redução resulta numa melhor noção de profundidade de campo – fundamental para a fotogrametria.

Os obturadores – também conhecidos como *Shutter* – regulam os tempos de abertura, segmentados em frações de segundos. Seu ajuste está relacionado com a quantidade de luz ambiente, que quando presente em baixos valores, permite exposições mais duradouras no CCD. É válido pontuar na aerofotogrametria que devido ao fato do veículo aéreo estar em movimento, os ajustes do *shutter* devem estar em consonância com a velocidade e altura de voo para evitar o fenômeno *rolling shutter*, que provoca uma espécie de borrado na imagem em função dessa

cinemática. Segundo Figueiredo (2018), também existem faixas ótimas para trabalhar com o tempo de abertura conforme a figura 2.5 A.

Por fim, o terceiro pilar, definido pela *International Organization for Standardization* (ISO), legado das câmeras analógicas, se incorpora no meio digital como um processamento vinculado à sensibilidade do sensor, capaz de amplificar a energia de luminosidade. Em contrapartida, este processamento aumenta o ruído ou granulometria da imagem. No caso da aerofotogrametria, o ISO ou ASA é utilizado no padrão mais baixo, uma vez que a natureza de captura das fotos aéreas é comumente realizada em ambientes externos com luz natural (Figura 2.5 B).

Figura 2.5 A: Shutter, Abertura e ISO na fotogrametria por drones.

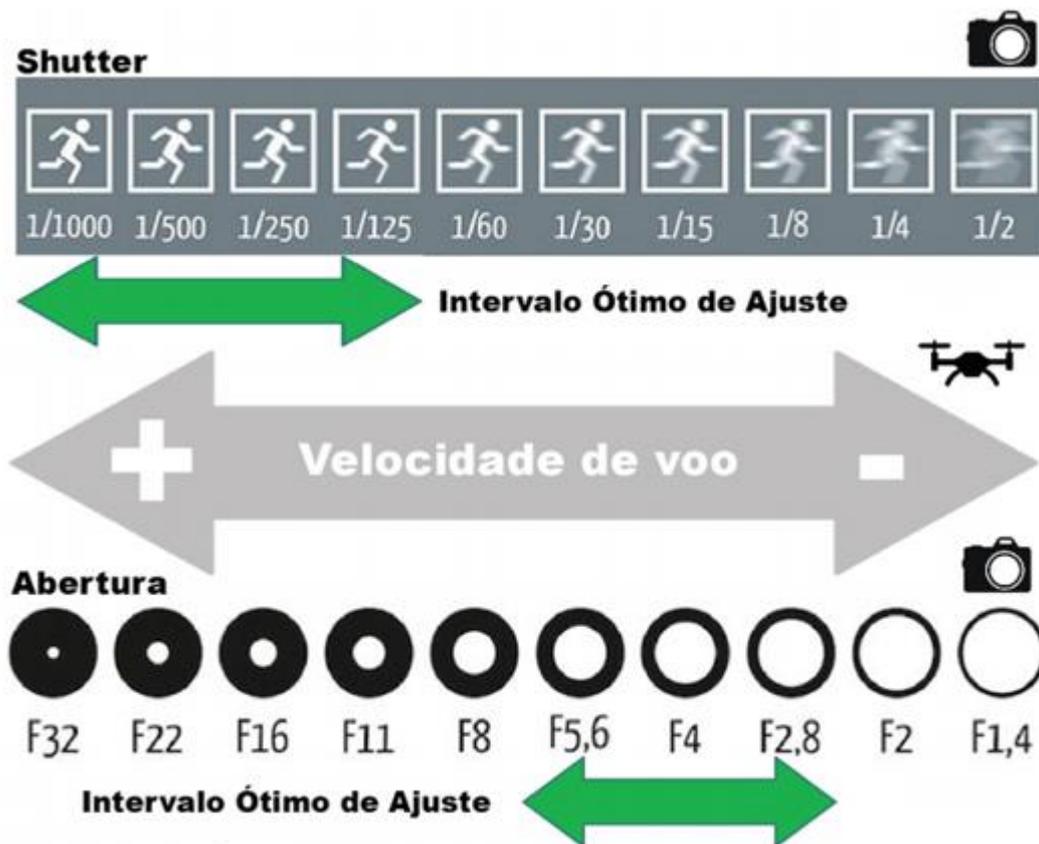


Figura 2.5 B: ISO na fotogrametria por drones. .



Fonte: Figueiredo, 2018. [Cirtec75.indd \(embrapa.br\)](#)

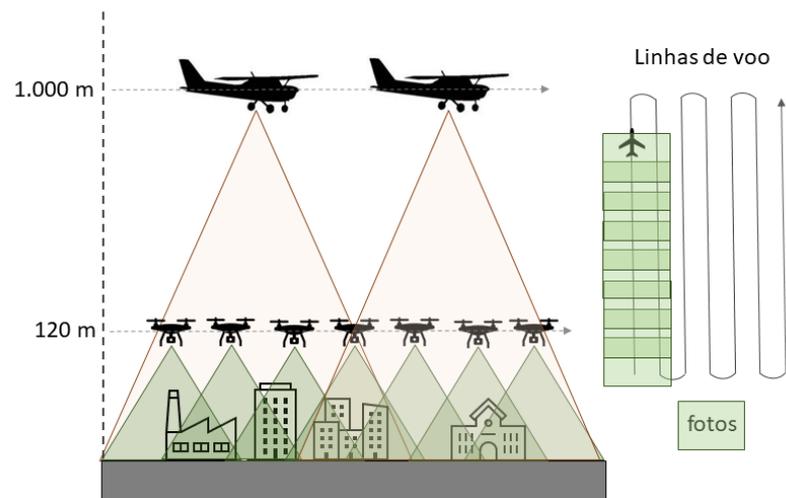
Ressalta-se que as fotos por si, não são capazes de configurar uma representatividade tridimensional ou ortogonal do ambiente registrado, enquanto não forem submetidas à processos físicos de estereoscopia, ou seja, faz-se necessário tomadas sequentes com sobreposições para que registros de coordenadas X,Y e Z possam ser identificados. Este fenômeno se chama paralaxe e pode ser explicado da seguinte forma:

*“A paralaxe é o deslocamento relativo de um ponto-imagem nas fotografias aéreas consecutivas em relação a direção da linha de voo decorrente da mudança da câmera no momento da exposição, além disso pode ser medida sobre o plano da foto e expressar a diferença de altura entre dois ou mais objetos.” TEMBA, 2000.*

Abstraindo-se da tipologia do veículo que transporta a câmera, os processos de estereoscopia são semelhantes, salvo a taxa de cobertura longitudinal e lateral de 60% e 30% para aeronave tripuladas (ANDRADE 2003) e 75% e 70% para drones (Guia do usuário Drone Deploy, 2020). As razões para esta diferença são legais e técnicas. De acordo com o Regulamento Brasileiro de Aviação Civil Especial nº 94/2017, as aeronaves remotamente pilotadas de cunho comerciais são limitadas a voar até 120 metros em relação ao ponto de decolagem, salvo autorizações especiais

concedidas pelo órgão fiscalizador. Quanto à técnica, a capacidade dos drones transportarem equipamentos pesados – *payload* – é limitada e com isso, câmeras de grande formato não são permitidas nestes veículos. Além disso, existe uma característica particular do algoritmo SfM, que demanda uma grande sobreposição de imagens para elaboração dos mosaicos.

Figura 2.6: Esquema de sobreposição longitudinal e lateral da aerofotogrametria.



Fonte: Autor, 2021

De qualquer forma, ambos os métodos descritos entregam produtos com excelentes resultados visuais, porém, faz-se necessária a transferência de referências métricas, representadas por coordenadas, para as fotos representarem em escala a realidade mapeada.

Para a melhoria da geometria das imagens, pontos de controle naturais ou artificiais são rastreados em campo por meio de instrumentos GNSS (*Global Navigation Satellite System*), que transferem a precisão observada nos equipamentos para o ortomosaico. Obviamente, quanto maior a rede de pontos e mais preciso forem os instrumentos de leitura de coordenadas, melhores serão os resultados na composição posicional do produto cartográfico. Segundo Neto (2017), o Brasil adota como instrumento normativo regulador da precisão cartográfica o Decreto-lei nº 89.817, de 20 de junho de 1984, denominado Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC), que em função dos avanços tecnológicos na obtenção de dados espaciais, a Diretoria de Serviço Geográfico do Exército Brasileiro (DSG) instituiu o PEC-PCD, onde as três

últimas siglas significam Produtos Cartográficos Digitais e admitem as seguintes precisões:

Tabela 2.1 : Parâmetros de erros admissíveis no PEC-PCD

Planimetria (X,Y)								
PEC PCD	Escala							
	1:1.000	1:1.000	1:2.000	1:2.000	1:5.000	1:5.000	1:10.000	1:10.000
	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)
A	0,28	0,17	0,56	0,34	1,4	0,85	2,8	1,7
B	0,5	0,3	1	0,6	2,5	1,5	5	3
C	0,8	0,5	1,6	1	4	8	8	5
D	1	0,6	2	1,2	5	10	10	6
Altimetria (Z)								
A	0,5	0,33	0,5	0,3	1	0,67	2,5	1,67
B	0,6	0,4	0,6	0,4	1,2	0,8	3	2
C	0,75	0,5	0,75	0,5	1,5	1	3,75	2,5
D	1	0,6	1	0,6	2	1,2	5	3

Fonte: Diretoria de Serviço Geográfico do Exército Brasileiro (DSG)

Para se obter os valores de precisão, amostragens devem ser realizadas e os pontos testados devem apresentar valores inferiores ao Padrão de Exatidão Cartográfica e o RMS (*Root Mean Square*), denominado Erro Padrão (EP) da norma a partir das equações (NETO, 2018):

$$Disc_p = \sqrt{(X_{tes} - X_{ref})^2 + (Y_{tes} - Y_{ref})^2}$$

$$RMS_{Disc} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Disc_p)^2}{n-1}}$$

Onde:  $X_{test}$  e  $Y_{test}$  = coordenadas capturadas em campo para testagem

$X_{ref}$  e  $Y_{ref}$  = coordenadas da imagem.

Vale ressaltar que alguns veículos são equipados com GNSS de altíssima precisão integrado às câmeras, que fornecem a coordenada do centro da foto e que reduzem a quantidade de pontos de controle em solo, mas em contrapartida elevam o custo do equipamento.

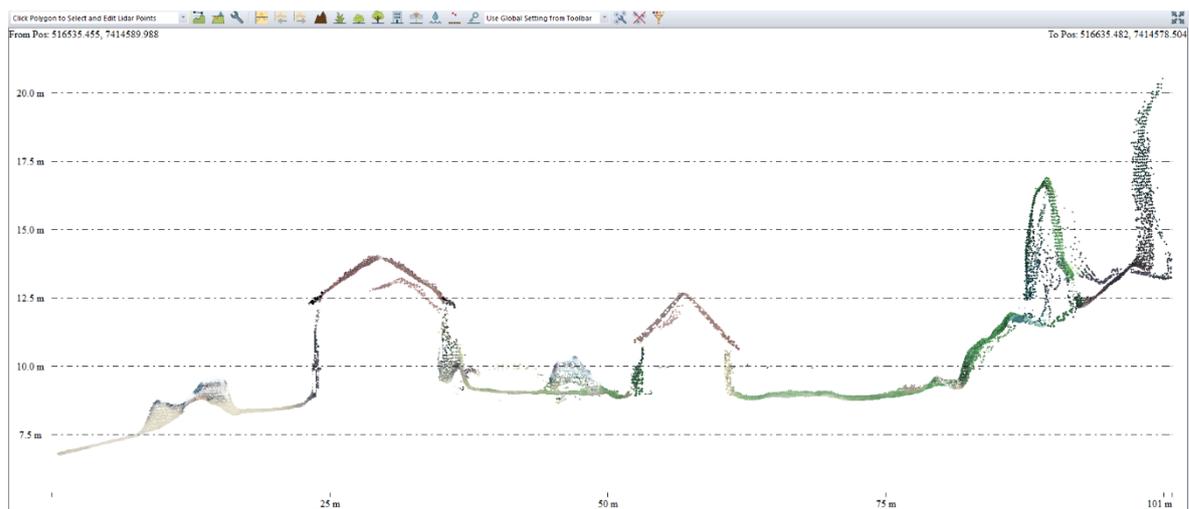
Outra metodologia aplicável para melhorar a qualidade do ortomosaico é a técnica denominada ortorretificação. Segundo Martin (2020), a ortorretificação consiste num processo de correção digital da imagem, onde cada pixel é colocado na

posição geométrica teórica como se eles tivessem sido imageados na vertical ou mais próximo desta situação, a partir de uma maquete digital do relevo.

## 2.2 A luz como modeladora de superfícies

Conforme analisada na seção anterior, a variação dos comprimentos de ondas eletromagnéticas pode ser capturada por sensores imageadores e decodificadas por meio de *pixels* para que sua composição visível seja transmitida. No entanto, outras tecnologias que utilizam a luz, agora sob a perspectiva da sua velocidade, também são empregadas em estudos de mapeamento, é o caso do *Light Detection and Ranging* (Lidar). Segundo Dong & Chen (2018) o Lidar é uma tecnologia que mede as distâncias ou intervalos baseados na resposta de tempo de pulsos contínuos de laser sobre determinada superfície. Ao contrário das câmeras fotográficas, a energia é originária do sensor, ou seja, sua principal função é calcular o tempo gasto para a luz emitida atingir um obstáculo e retornar para o ponto de origem. Sua resposta é obtida por meio de um ponto com coordenadas X,Y,Z e intensidade da cor.

Figura 2.7: Nuvem de pontos lidar no software Global Mapper v19.0



Fonte: Autor, 2021.

Uma das principais características dessa tecnologia é que os pulsos de luz são capazes de penetrar na copa das árvores e identificar pontos na superfície do solo,

que ao serem classificados em softwares especialistas, fornecem Modelos Digitais de Terreno MDT.

Porém, os elevados custos dessa tecnologia associado ao peso dos sensores – que permitem serem transportados em veículos com um alto *payload* – fazem com que muitos projetos de mapeamento sejam inviabilizados. De acordo com Graham (2018), alguns equipamentos chegam a custar quantias acima de U\$100.000,00, no entanto, deve-se ainda considerar os custos com mão de obra, aeronaves, licenças e insumos.

Como forma de contornar estes entraves financeiros, tecnologias complementares de mapeamentos vêm sendo empregadas e testadas como soluções de baixo custo. Isso se deve ao fato de a fotogrametria ter incorporado algoritmos de visão computacional que permitem estimativas de formas e elevações de superfícies mapeadas a partir de estereoscopia digital – SfM que será explorada no capítulo seguinte.

## 2.3 Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE VIAÇÃO CIVIL ANAC - **Requisitos Gerais para Aeronaves não Tripuladas de uso Civil. RBAC-E 94 EMD 00.** ANAC, 2017. Disponível em: <https://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/rbha-e-rbac/rbac/rbac-e-94>. Data do acesso: 15/12/2020.

ALKOBI, J. - **The Evolution of Drones: From Military to Hobby & Commercial.** Disponível em: <https://percepto.co/the-evolution-of-drones-from-military-to-hobby-commercial/>. Data de acesso: 31/12/2020.

ANDRADE J. B. – **Fotogrametria.** Curitiba, SBEE, 274p. 2ª edição 2003.

BAUMANN P.R. - **History of Remote Sensing, Aerial Photography.** Disponível em: <http://employees.oneonta.edu/baumanpr/geosat2/rs%20history%20i/rs-history-part-1.htm>. Data de acesso: 25/03/2020.

DIGITAL KAMERA MUSEUM – Berlim. Disponível em: <https://www.digitalkameramuseum.de/en/history>. Data de acesso: 27/03/2020.

DIRETORIA DO SERVIÇO GEOGRÁFICO DSG. **Especificação Técnica Para a Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais (ET-ADGV).** Brasília, Brasil, 2011. Disponível em: [http://www.geoportal.eb.mil.br/portal/images/PDF/ET\\_ADGV\\_Vs\\_2\\_1\\_3.pdf](http://www.geoportal.eb.mil.br/portal/images/PDF/ET_ADGV_Vs_2_1_3.pdf). Data de acesso: 12/12/2020.

DONG P. & CHEN Q. – **Lidar Remote Sensing and Applications**. New York. CRC Press. 221p. 2018

DRONEDEPLOY – **Guia do usuário**. Disponível em: <<https://support.dronedeploy.com/docs/making-successful-maps>>. Data do acesso 25/12/2020.

EISENBEIß H. - **UAV Photogrammetry**. 2009. 236p. Dissertação de mestrado. ETH Zurich. University of Technology Dresden, 2009. Disponível em: <<https://www.research-collection.ethz.ch/handle/20.500.11850/20976>>. Data do acesso 20/12/2020.

FIGUEIREDO E. O. e FIGUEIREDO S. M. M. - **Planos de Voo Semiautônomos para Fotogrametria com Aeronaves Remotamente Pilotadas de Classe 3**. Circular técnica Embrapa Rio Branco, AC. 2018. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/187874/1/26750.pdf>. Data do acesso 01/12/2020.

GRAHAM L - **Drone Mapping – SfMSfM versus Low Precision LIDAR**. Geocue Group 2018 Disponível em: <<https://support.geocue.com/drone-mapping-sfmSfM-versus-low-precision-lidar/>>. Data de acesso: 10/12/2020.

HORST, F. - Wikimedia Commons CC BY-SA 4.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0>>. Data de acesso: 10/12/2020.

JOHNSON, C.S. – **Science fot the Curious Photographer**. Natick, Massachusetts A K Peters, 181p, 2010.

KONECNY, G. – **Geoinformation Remote Sensing, Photogrammetry, and Geographic Information**. New York. CRC Press Systems 2 ed. 452p, 2014.

KRAUS, K. – **Photogrammetry. Geometry from Images and Laser Scans**. New York, Walter de Gruyer 2 ed. 477p, 2004.

MARTIN L. – **Ortorretificação, como funciona?** Disponível em <<http://www.engesat.com.br/ortorretificacao-como-funciona/>>. Data do acesso 20/12/2020.

MAXWELL J. C. - **A Dynamical Theory of the Electromagnetic**. 1865 Field Disponível em: <<http://www.bem.fi/library/1865-001.pdf>>. Data do acesso 10/12/2020.

NETO, F.D.F – **Avaliação da acurácia posicional de ortofotos geradas por SISVANT**. 2018. 104p. Tese. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Viçosa. 2018. Disponível em: <[http://bdtd.ibict.br/vufind/Record/UFV\\_c947791e81e5122709fee45f538ab592](http://bdtd.ibict.br/vufind/Record/UFV_c947791e81e5122709fee45f538ab592)> Data do acesso 10/12/2020.

TEMBA, P. – **Fundamentos da Fotogrametria**. Apostila do departamento de Cartografia da UFMG. 2000 Disponível em: <<http://www.csr.ufmg.br/geoprocessamento/publicacoes/fotogrametria.pdf>> Data do acesso 10/12/2020.

VALAVANIS, K. P. OH, P. & PIEGL, L. - **Unmanned Aircraft Systems**. International Symposium on Unmanned Aerial Vehicles, UAV 08. Springer, 2008.

WITTEN, N. M. - **The Chemistry of Photograph**. Senior These. University of South Carolina, Columbia, 2016. Disponível em: [https://scholarcommons.sc.edu/senior\\_theses/84/](https://scholarcommons.sc.edu/senior_theses/84/). Data do acesso 10/12/2020.

### CAPÍTULO 3.        **STRUCTURE FROM MOTION – UMA BREVE NARRATIVA**

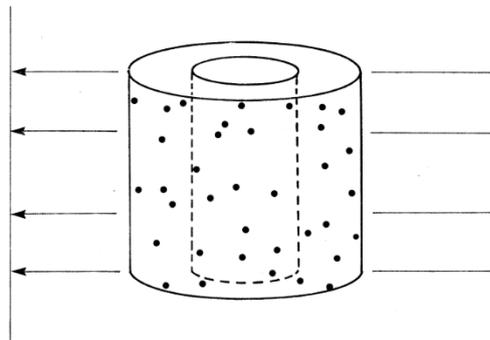
A computação gráfica assume dois papéis no cotidiano humano, o primeiro como uma arte de comunicação visual, seguido como uma ciência transdisciplinar embarcada por métodos físicos e matemáticos entre computadores e *displays* (HUGHES *et al.*, 2013). Ainda que sua origem fora datada nos anos 50, passou por um célere progresso a partir da popularização dos computadores em face dos avanços técnicos alcançados pelos processadores e armazenamento em disco, sobretudo no final da década de 70. Pode-se também fazer um paralelo da corrida da computação gráfica com a indústria do entretenimento de *video games* e cinema. Neste período surgem o console de jogos Atari e o estúdio *Lucas Film*, que marcou gerações com o lançamento da saga *Star Wars* com significativos avanços no uso de recursos de computação gráfica em movimento *wire-frame* - cena *Death Star Briefing*, em *Episode IV, A New Hope*, 1977 (GRAHAME 2008).

Contudo, sabe-se que o estado da arte destas técnicas absorvera determinados processos de maturação criados há algumas décadas. Um dos principais estudos foi o experimento analógico denominado *Kinetic Depth Effect* (WALLACH & O'CONNELL, 1953) no qual o psicólogo Hans Wallach analisou a percepção de projeções tridimensionais a partir da animação ou movimento de imagens. O ensaio consistiu em uma ilustração de um cubo de arame estático com uma sombra projetada. Naturalmente o observador absorve a projeção ortográfica bidimensional. No entanto, quando a figura passa por um processo de animação, rotacionando em seu próprio eixo, o cérebro humano simula a percepção de tridimensionalidade a partir da movimentação das arestas da figura (ULLMAN, 1976).

A partir destes estudos, o cientista da computação Shimon Ullman, do Laboratório de Inteligência Artificial da *Massachusetts Institute of Technology* MIT, formulou na década de 70, em ambiente computacional, o que viria a ser o protótipo de um dos algoritmos de modelagem tridimensional mais relevantes na aerofotogrametria moderna, o *Structure From Motion* SfM. A principal questão do seu teorema consistia na inferência tridimensional de um bloco a partir de projeções bidimensionais, uma vez que nenhuma informação 3D é transmitida nas projeções individuais. Para a demonstração do SfM, foram projetados em um monitor dois cilindros, cada um deles definido por 100 pontos espalhados randomicamente em sua

superfície lateral (Figura 6). As coordenadas de cada um dos pontos foram armazenadas na memória do computador. Passa-se então a simular a rotação dessa projeção do cilindro, em 36 posições a cada  $10^\circ$  em determinado intervalo de tempo no sentido horário. As primeiras percepções tridimensionais puderam ser abstraídas nas próprias projeções, quando colocadas em movimento, uma vez que a densidade dos pontos se concentrava nas bordas do cilindro, proporcionando noções de profundidade, ao passo que ao analisar as figuras estáticas, segundo Ullman (1976), cada quadro da apresentação era uma visão desconhecida e irreconhecível dos dois cilindros, indicando que a familiaridade e reconhecimento não são pré-requisitos para a interpretação do movimento.

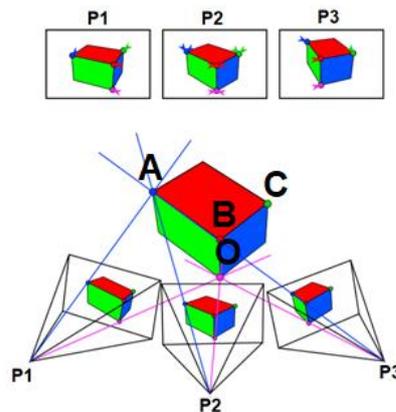
Figura 3.1: Modelo de Ullman



Fonte: The Interpretation of Visual Motion. Ullman, 1976.

A partir do experimento dos cilindros, Ullman absorve a ideia em que os pontos projetados seriam a chave para modelagem tridimensional. Segundo o autor, uma reconstrução métrica única é possível a partir de três projeções contendo quatro pontos. Para formular tal correspondência, foram dados então os pontos O, A, B e C em três projeções ortográficas P1, P2 e P3. (figura 3.2).

Figura 3.2: Modelo lógico do SfM.



Fonte: Galland *et.al.* 2016.

O teorema de Ullman baseou-se também no estudo de Kruppa (SNAVELY, 2008) no ano de 1913, que induziu a trigonometria como chave para a definição dos parâmetros tridimensionais de dada projeção. Para tal, Ullman definiu uma coordenada no ponto O e por meio do relacionamento cartesiano, foram atribuídas coordenadas aos pontos A, B e C. O *motion* assumido se deu por meio da rotação e translação das cenas P1, P2 e P3. Dado que  $a$ ,  $b$  e  $c$  sejam os vetores que conectam o Ponto O aos pontos A, B e C, pode-se obter as coordenadas tridimensionais de cada ponto.

Absorvendo o relacionamento de pontos e seu elevado potencial para modelagem tridimensional, Lucas e Kanade em 1981 desenvolvem o método de estimativa do fluxo óptico que viria a se tornar o algoritmo mais popular para a estereoscopia digital (CAMPOY *et. al.*,2008).

*“Apresentamos uma nova técnica de registro que utiliza a intensidade espacial gradiente das imagens para encontrar uma boa correspondência usando um tipo de alteração de Newton-Raphson. Nossa técnica é mais rápida porque examina menor quantidade de possíveis correspondências entre as imagens do que as técnicas existentes. Além disso, essa técnica pode ser generalizada para lidar com rotação, escala e cisalhamento.”*  
(LUCAS & KANADE, 1981).

Segundo Campoy *et. al.* (2008), a maioria dos elementos referenciais em uma imagem possui uma posição bem definida, como por exemplo as geometrias das

formas representadas na matriz. Com isso, o algoritmo funciona a partir de duas premissas, a primeira é que a intensidade de pixels deve existir para que uma geometria possa ser bem identificada e a segunda está relacionada à mudança na posição das feições em diferentes cenas, que devem ser mínimas. Por exemplo, dado uma feição  $p_i$  com coordenadas  $(X, Y)$  na cena  $I_k$ , o rastreador tentará encontrar a mesma posição na feição seguinte  $I_{k+1}$  que formula a expressão  $p'_i = (X, Y) + t$  onde:

$t = (t_x \ t_y)$  sendo  $t$  o vetor do movimento entre as duas cenas e pode ser definido pela função:

$$e(t) = \sum^w (I_k(p_i) - I_{k+1}(p_i + t))^2 w(W)$$

Onde:

$w(x)$  é uma função para atribuir pesos diferentes à janela de comparação  $W$

Este fenômeno é denominado *motion tracking*, que resulta em dezenas de vetores dispostos aleatoriamente nas cenas. Campoy *et. al.* (2008), atribuem a seleção randômica das feições ao algoritmo *Random Sample Consensus* RANSAC desenvolvido por Fischler e Bolles, em 1981. Segundo Campoy, o RANSAC seleciona aleatoriamente um subconjunto de pontos que são submetidos a testes e este procedimento é repetitivo até que sejam eleitos os melhores pontos para a composição da movimentação da feição. Portanto, Fischler & Bolles (1981) buscam com o RANSAC se oporem à algumas técnicas correntes a fim de reduzir a quantidade de pontos *landmarks* para melhorias no tempo de resposta.

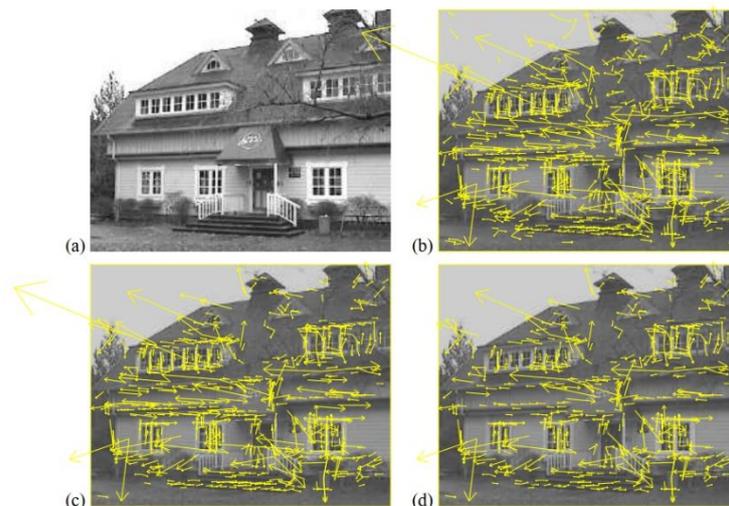
Contemporâneo ao estudo de Lucas e Kanade, em 1981 Hans P. Moravec do instituto de robótica da *Carnegie-Mellon University* também trata dos referenciais das cenas, no entanto, a partir das quinas dos objetos - *corners* - como elementos chave para a detecção da geometria tridimensional.

A aplicabilidade do seu estudo era sistematizar o caminhamento de um robô com aptidão para desviar de obstáculos em seu percurso, mas serviu também como premissa para que em 1988 desenvolvessem o algoritmo *Corner and Edge Detector* (HARRIS & STEPHENS, 1988). O estudo de Harris & Stephens consistiu no aprimoramento dos detectores de quinas, ao desenvolver um algoritmo que respondia a identificação das curvas e bordas nas cenas, que mais tarde, em 1999, David Lower,

do departamento de computação da *University of British Columbia*, Canadá, publicou no Congresso Internacional de Computação Visual do ano de 1999 o *Scale Invariant Feature Transform* SIFT, aquele que viria a ser o algoritmo base para a estereoscopia digital do SfM utilizado em um dos mais populares softwares de aerofotogrametria do mercado, o Agisoft Metashape (SHERVAIS, 2016) a partir dos *keypoint descriptors*.

Segundo Lower (2004), o SIFT é composto por 4 estágios. O primeiro consiste na detecção da escala do espaço das cenas, seguido da localização dos *keypoints* para a correspondência. Assim, são atribuídas as orientações das cenas para que por fim ocorra a mensuração dos dados de iluminação e distorção dos pontos - *keypoint descriptors*. Sumariamente é descrito como um mecanismo de busca dos melhores pontos homólogos entre as diferentes cenas que tem como resultante uma nuvem de pontos tridimensional esparsa obtida pelo *Bundle Adjustment* (WESTOBY *et.al.*,2012).

Figura 3.3: Identificação dos *keypoints*.



Fonte: Lower,2014.

As virtudes do SIFT fazem dele um algoritmo versátil para aplicações em vários campos da ciência que demandam modelagem tridimensional, principalmente quando se coleta dados com variância da rotação, escala e pequenas mudanças na iluminação (SILVEIRA *et. al.*, 2011).

A partir da seleção dos *keypoints*, aplica-se então o algoritmo *Bundle Adjustment*, que cumpre um importante papel na consolidação dos dados oriundos da trigonometria tridimensional do SfM. De acordo com Jubanski (2005), após o registro dos *keypoints* nas cenas, estabelece-se uma conexão entre seu feixe de luz com o

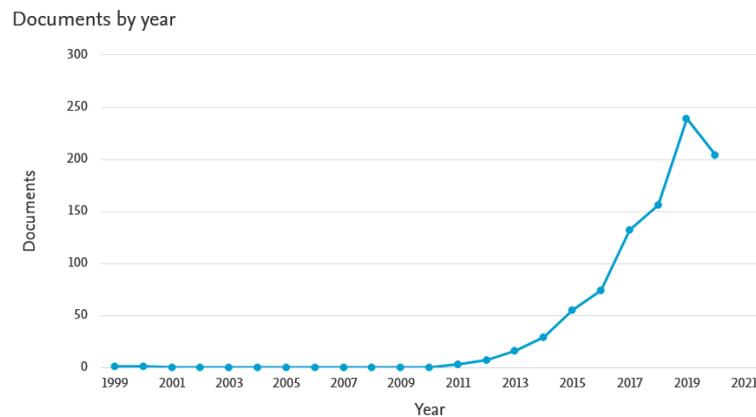
centro perspectivo da câmera. Para tal, o algoritmo busca encontrar estas posições de pontos 3D e parâmetros da câmera que minimizam o erro de reprojeção dos pontos homólogos entre os diferentes pares de cenas a partir de um problema de mínimos quadrados não linear, em que o erro é o quadrado da diferença entre a localização da característica observada e a projeção do ponto 3D correspondente no plano da imagem (AGARWAL *et.al.*, 2010). Como resultante deste ajuste, obtém-se a nuvem esparsa de pontos homólogos, a primeira representação de um bloco tridimensional do SfM que derivará a nuvem de pontos densa a partir do *Multi-view Stereo - MVS*.

O MVS consiste em densificar a nuvem esparsa a partir da vasta coleção de cenas de um objeto por diferentes posições e o estabelece como um sólido. Para isso, independentemente do ângulo de captura, deve-se obter uma taxa de sobreposição entre as cenas que varia entre 60 a 80% (VERHOEVEN *et.al.*, 2012).

Para entender melhor o quão poderoso é a intensidade de criação de pontos a partir do MVS, dos 44 hectares da área mapeada no presente estudo, foram encontrados, no software utilizado para o processamento, aproximadamente 770 mil *keypoints* na nuvem esparsa do SIFT (17,5 pontos/m<sup>2</sup>) e aproximadamente 97 milhões de pontos na nuvem densificada do MVS (220 pontos/m<sup>2</sup>).

Apoiados nesta etapa, processos de criação de malhas triangulares (TIN), sólidos e ortomosaicos, capazes de expressar feições centimétricas da paisagem, passam a ser permitidos nos mais diversos softwares especialistas disponíveis no mercado. Neste momento, a Fotogrametria é instigada a absorver os proveitos citados acima. Como consequência, observa-se um pico na produção científica – plataforma *Scopus* nos últimos 20 anos (Gráfico 3.1) –, no qual foi quantificada a produção de periódicos com as palavras chaves *photogrammetry* e a sigla SfM.

Gráfico 3.1: Bibliometria do tema fotogrametria associada com *Structure from Motion* na plataforma *Scopus*.



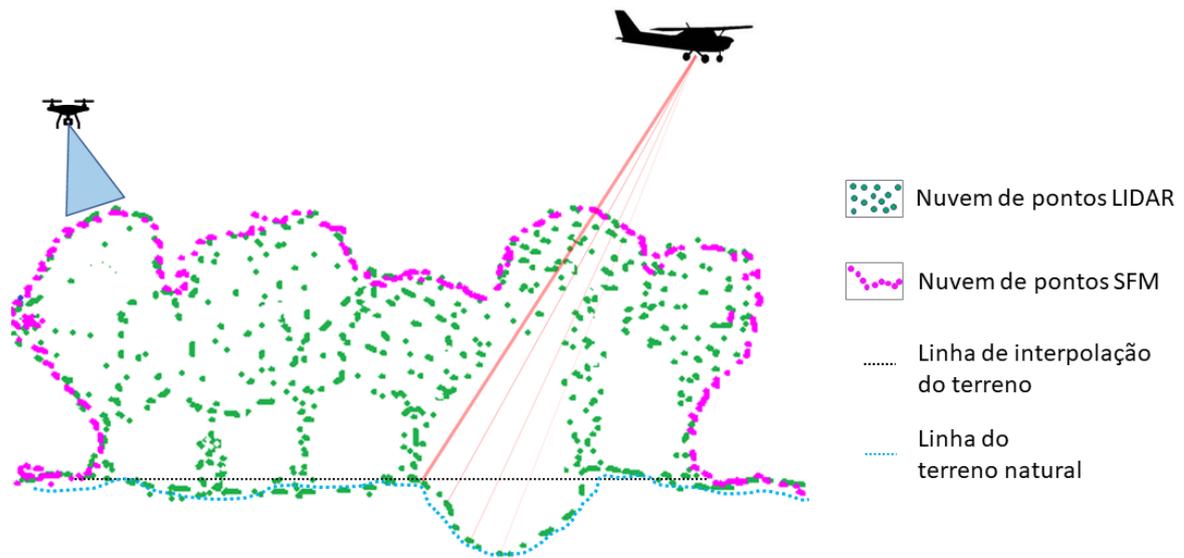
Fonte: Scopus, acessada em dezembro de 2020.

Salvo o ano de 2020, que ocasionalmente apresentou um decréscimo de publicações, possivelmente por influência da pandemia e *lock-down* na grande maioria dos países, pôde-se observar que o assunto obteve um salto significativo, principalmente a partir de 2013, muito em função da popularização dos *Drones*, conforme narrado anteriormente.

### 3.1 As limitações do SfM

O crescente aumento constatado no uso do SfM na fotogrametria e na modelagem de cenários também trouxe à tona aquela que seria a principal fraqueza do algoritmo – a extração de dados do terreno natural – principalmente sob florestas ou vegetação densa. Este processo, tão simplificado com os sensores lidar, limita o SfM a representar efetivamente a superfície registrada, uma vez que sua concepção ocorre a partir de uma vasta coleção de fotografias, nas quais o plano projetado no CCD da câmera é a única informação a ser trabalhada para a modelagem tridimensional (Figura 3.4)

Figura 3.4: Comparativo do Lidar versus SfM



Fonte: Autor, 2021.

Esta falha pode ser contornada através de filtros classificadores que excluem objetos indesejados, manualmente ou por meio de algoritmos de seleção automática de feições. O software Agisoft Metashape Pro, por exemplo, tem se destacado no mercado por apresentar parâmetros para classificar a nuvem de pontos e poder extrair as feições que não pertencem ao terreno natural. São eles:

Ângulo máximo – primeira condição checada – que consiste numa limitação de ângulo projetado na linha do solo e os pontos vizinhos próximos, ou seja, todo objeto acima do ângulo estabelecido será eliminado da nuvem de pontos. Distância máxima, que compreende no tamanho do objeto avaliado em relação ao solo, definida por metros, e por fim, Tamanho da célula, que representa aglomerado de pontos da nuvem a ser dividida como uma etapa preparatória no procedimento de classificação de pontos básicos. (Manual do usuário Agisoft, 2020).

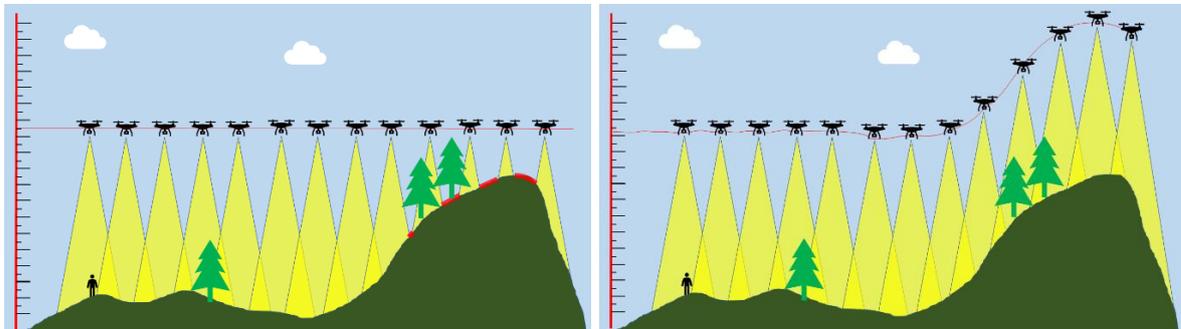
Além disso, como alternativas de melhoria no processo de filtragem, o software é capaz de realizar classificações supervisionadas a partir da composição RGB do ponto e seu agrupamento. Conforme dados do fabricante, são utilizados algoritmos proprietários de inteligência artificial para a identificação dessas classes de uso e ocupação da superfície terrestre, como: estradas, florestas, pastagens, edificações, dentre outros. Após o operador eliminar todas as classes não compreendidas como elemento do terreno natural, ocorre um preenchimento dos espaços vazios com vetores que formam triângulos, oriundos da nuvem de pontos de terreno mais próxima.

Dessa forma, a malha triangular reformula o MDT, todavia, tal técnica se torna incapaz de definir qualquer variação contida nestes espaços interpolados, como demonstrado na figura 3.4. Mesmo com esta limitação, a técnica de filtragem e interpolação pode ser bem-vinda em estudos em áreas com pouca densidade de vegetação.

Outro limitador do SfM, agora exclusivamente em veículos aéreos que voam em baixas altitudes, é a necessidade de acompanhamento da variação do gradiente do terreno para que o SIFT consiga identificar os pontos homólogos a partir da sobreposição entre as diversas fotos capturadas. Em razão do ângulo de abertura da câmera e da variação de altitude da superfície mapeada, algumas áreas podem não ser cobertas, com isso, a identificação dos *keypoints* fica limitada somente em áreas com sobreposição (figura 3.5).

Uma vez que o primeiro processo do SfM é a busca desses pontos homólogos, em alguns softwares denominado “alinhamento das fotos”, os buracos e ausência de correspondência são transmitidos para as fases posteriores, que acabam comprometendo a qualidade da ortofoto e do MDS.

Figura 3.5: Comparativo de voo com altitude fixa (esquerda) com altitude relativa ao solo (direita).



Fonte: Autor, 2021

Para contornar este problema, alguns softwares de automação de voos contêm dados da superfície do terreno para dimensionamento da altitude da missão. São carregados MDTs oriundos da missão *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), da NASA, que mapeou todo o globo terrestre com sensores de radar e entregou uma matriz com GSD de 90 metros, contendo o valor médio da cota, em relação ao nível da elipse terrestre para cada pixel.

Em contrapartida, os voos automatizados nestes softwares são executados em velocidades mais baixas do que os mesmos realizados nos horizontais, mas garantem

a sobreposição lateral e longitudinal configurada. De toda forma, para análises como a aqui proposta, não há dependência de interpolações e triangulações dos MDTs, uma vez que a superfície terrestre e seus obstáculos naturais são de extrema valia para a simulação de irradiação solar sobre telhado (FRANCO E PINHEIRO, 2020), inferindo que o SfM poderá ser uma solução de baixo custo para o dimensionamento almejado.

### 3.2 Referências

AGARWAL S.; SNAVELY N.; SEITZ S.M.; SZELISKI R. - Bundle Adjustment in the Large. **N. Computer Vision – ECCV 2010. Computer Science**, v. 6312, 2010.

CAMPOY P.; CORREA J.F.; MONDRAGÓN I.; MARTINEZ C.; OLIVARES M.; MEJIAS L.; ARTIEDA J. - **Computer Vision Onboard UAVs for Civilian Tasks**. International Symposium on Unmanned Aerial Vehicles, 2008.

COMPUTER HISTORY MUSEUM – Califórnia. Disponível em: <<https://www.computerhistory.org/timeline/graphics-games/>>

DEATH BRIEFING STAR WARS. Disponível em <<https://www.youtube.com/watch?v=TOgtj00Rp8s>>

FISCHLER M.A., & BOLLES R.C. - **Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography**. Commun. ACM, 24, 381-395. 1981.

FRANCO G. G. e PINHEIRO R. L. - Estudo comparativo das estimativas de energia fotovoltaica gerada sobre superfícies tridimensionais em ambiente SIG e das informadas pela plataforma Sundata. **Brazilian Journal of Development**. v. 6(12), 2020 Disponível em: <<https://www.brazilianjournals.com/index.php/BRJD/article/view/20830/16627>>

GRAHAME J. - **Star Wars: Prehistoric Computer Graphics**. Retro thing 2008. Disponível em: <<https://www.retrothing.com/2008/04/star-wars-prehi.html>>. Data de acesso: 10/10/2020.

HARRIS, C. & STEPHENS, M. - A Combined Corner and Edge Detector. **Proceedings of the 4th Alvey Vision Conference** p.147-151. 1988.

HUGHES, J F; DAN, A; MCGUIRE, M; SKLAR, D. F; FOLEY, J. D; FEINER, S. K; AKELEY, K. J. F. **Computer graphics: Principles and practice**. Upper Saddle River, NJ. Addison-Wesley,1296 p. 2013.

JUBANSKI J. J. - **Desenvolvimento e avaliação de um sistema de vôo apoiado por GPS para aerotriangulação por feixes de raios**. Dissertação. 116p. UFPR. Pós Graduação em Ciências Geodésicas, 2005. Disponível em: <<https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/37186>>. Data de acesso: 12/03/2020.

LOWE, D.G. - Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. *International Journal of Computer Vision*, v.60, p.91-110, 2004

LUCAS B. D. & KANADE T. - **An Iterative Image Registration Technique with an Application to Stereo Vision**. International Joint Conference on Artificial Intelligence, v. 81, p.121-130, 1981.

SHERVAIS K. - **Structure from Motion from Motion (SfMSfM) Photogrammetry Field Methods Manual for Students**. Provided by UNAVCO. Disponível em: <<http://kb.unavco.org/kb/article/structure-from-motion-sfmSfM-agisoft-photoscanprocessing-guide-848.html>>. Data de acesso: 23/03/2020.

SILVEIRA, M. T.; FEITOSA, R. Q.; BRITO, J. L. N. S; JACOBSEN, K. - **Correspondência eficiente de descritores SIFT para construção de mapas densos de pontos homólogos em imagens de sensoriamento remoto**. Boletim de Ciências Geodésicas. v.17(1), p. 130-160, 2011. Disponível em:< <https://doi.org/10.1590/S1982-21702011000100008>>.

SNAVALEY, N. - **Scene Reconstruction and Visualization from Internet Photo Collections: A Survey**. IPSJ Trans. Computer Vision and Applications, v3, p.44-66, 2008.

ULLMAN, S. - **The interpretation of structure from motion from Motion**. Proceedings of the Royal Society of London. Series B. Biological Sciences, v.203 405-426, 1979.

VERHOEVEN G, DONEUS M, BRIESE CH, VERMEULEN F. - Mapping by matching: a computer vision-based approach to fast and accurate georeferencing of archaeological aerial photographs, *Journal of Archaeological Science*, v. 39(7) 2012,

WALLACH H.; O'CONNELL D. N., & NEISSER, U. - The memory effect of visual perception of three-dimensional form. *Journal of Experimental Psychology*, v. 45(5), p. 360–368, 1953.

WESTOBY M. J.; BRASINGTON J.; GLASSER, N. F.; HAMBREY M. J. & REYNOLDSJ. M. - **Structure-from-Motion photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications**. *Geomorphology*, v. 179, p.300-314, 2012. Disponível Em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305440312000866>>. Data de acesso: 20/03/2020.

## **CAPÍTULO 4. A LUZ COMO FONTE DE ENERGIA**

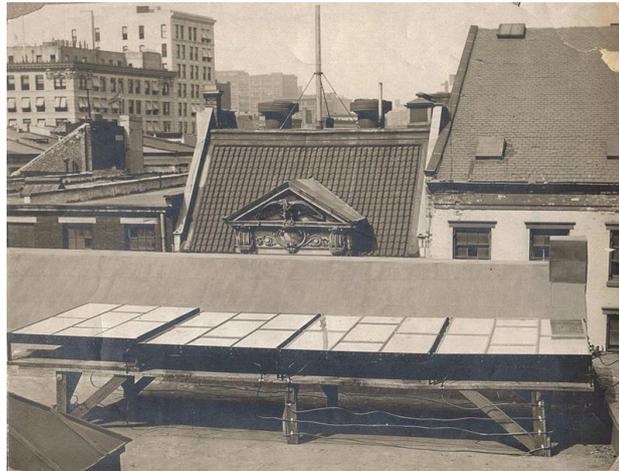
Como visto nos capítulos anteriores, admite-se que a decomposição da luz solar foi um conjunto de experimentos, que no século XIX e início do XX solucionou questões que transitavam desde o entendimento das cores do espectro visível até as que envolviam transferência de calor. Também consagrou grandes cientistas, como Albert Einstein e James Maxwell, e ainda está presente nos diversos estudos e avanços tecnológicos da humanidade.

Apesar das recentes descobertas datadas de dois séculos atrás, a dependência da energia solar coexistiu com sociedades antigas, que mesmo sem sua compreensão técnica, se desenvolveram-se a partir de práticas agrícolas, pecuaristas e até militares. Segundo Szabó (2017), no Egito antigo já se utilizavam técnicas de represamento e evaporação da água do mar para extração do sal, no intuito de usar o insumo para preservar grãos e carnes por anos. Os gregos, em 287 A.C, convergiam a luz oriunda do sol em lentes e espelhos, transformando a energia concentrada num feixe de luz em uma poderosa arma contra os navios romanos. Tal equipamento foi capaz de incendiar as embarcações invasoras a uma distância considerável. Porém, somente no ano de 1839 que o físico francês Alexandre Edmond Becquerellar pôde demonstrar o Efeito Fotoelétrico, a partir da submersão de cloreto de prata em uma solução ácida, que quando submetida à luz solar, gerava corrente.

A partir deste estudo, nos anos seguintes, Willoughby Smith, William Grylls Adams e Richard Evans Day descobriram a capacidade do selênio de produzir e conduzir eletricidade, para que em 1883, Charles Fritts pudesse desenvolver e instalar em um terraço na cidade de Nova Iorque o primeiro módulo de geração de energia fotovoltaica (Figura 4.1).

De acordo com Chu e Tarazano (2019), a taxa de conversão de energia do equipamento de Fritts alcançou 1 a 2%, números baixos quando comparados às tecnologias atuais que chegam a até 25% de eficiência. Este índice denota a porcentagem de luz incidida no painel que foi convertida em energia e varia conforme material e tecnologia de fabricação. De toda forma, o inventor desencadeou uma corrida evolutiva, principalmente com as crises do petróleo na década de 1970, que culminou na aceleração do desenvolvimento de novas soluções e redução do custo de geração de energia renovável fotovoltaica (JONES e BOUANAME, 2012).

Figura 4.1: Módulos fotovoltaicos de Charles Fritts instalados num telhado de edifício em Nova Iorque



Fonte: Smithsonian Magazine, 2019. <https://www.smithsonianmag.com/sponsored/brief-history-solar-panels-180972006/>

Conforme Matejicek (2017), entende-se que a energia é a simples capacidade de realização de trabalho, independentemente de quais facetas sejam avaliadas: termal, cinética, potencial, elétrica, química, dentre outras. No que tange sua mensuração, observa-se que as unidades básicas de medida são denominadas Joule (J), que representa a quantidade de energia de 1 Newton por metro (1Nm) e Força (W) que representa a quantidade de energia consumida por determinado tempo Js ou Ws. Segundo Jäger *et al.* (2014), 1 Joule ou 1 Ws é um montante muito pequeno de energia quando comparado ao consumo de um corpo humano. Para isso, foi estabelecido então a grandeza kWh que é definida pela fórmula:

$$1\text{kWh} = 1000\text{W} \times 3600\text{seg} = 3.600.000 \text{ Ws}$$

Decompondo a fórmula acima para um exemplo prático, seria como se uma lâmpada com potência informada pelo fabricante de 100W ficasse ligada por 10 horas em um dia, seu consumo total seria de 1kWh. Tal entendimento é fundamental, principalmente devido à tarifação da energia distribuída pelas concessionárias brasileiras. O kWh é a unidade de medida utilizada para definição do montante a ser pago durante o período de 30 dias, e varia conforme a bandeira tarifária e as classes de uso. Já o Wp é a unidade utilizada pelos fabricantes de módulos fotovoltaicos para informar a potência do equipamento – em condições padrões de testes – e auxiliar no dimensionamento do sistema, conforme o consumo observado. Segundo Grimoni

(2019) o “p” representa Horas de Sol Pleno (HSP), que significa o número de horas que a irradiância solar deve ser constante e igual a 1000W/m<sup>2</sup>. Pinho e Galdino (2014) ressaltam que esta padronização despreza os efeitos da irradiância instantânea, assumindo uma totalidade média ao longo do dia, com isso, o HSP pode ser explicado a partir do valor diário de kW/m<sup>2</sup> diário.

$$\text{HSP} = \frac{\text{Valor diário kW/m}^2}{1\text{kW/m}^2} = \text{HSP horas/dia}$$

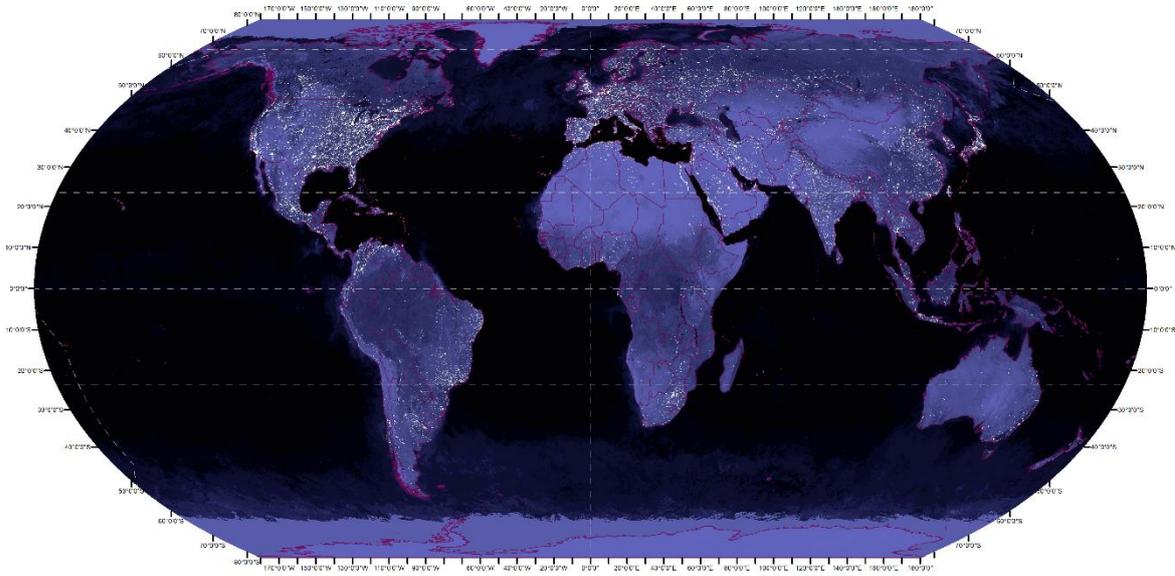
Com isso, se o fabricante de um painel fotovoltaico informou que o equipamento possui 360 Wp, significa que nos horários de sol pleno gera aquela grandeza de potência.

Jäger *et al.* (2014) também ressaltam um outro montante relevante, o Volt (V), este utilizado para mensuração de tensão elétrica, comumente utilizado nas células solares. São de grandezas bem pequenas e denotam o potencial de transmissão de energia, em Joules, necessária para percorrer entre dois pontos no espaço.

#### 4.1 A física e química na concepção da energia PV

O potencial de energia solar irradiado sobre a superfície da Terra é 174.000 TW, ou seja, 17,4<sup>16</sup>W sendo que dos 54% da irradiância incidida no topo da atmosfera, 7% é refletida e 47% absorvida pela superfície, o que resultaria em 94.000 TW de radiação direta. Os 46% restantes são absorvidos e refletidos pela atmosfera – radiação difusa – componente importante do efeito estufa (PINHO e GALDINO 2014). Para se ter uma noção dessa grandeza, no ano de 1800 o consumo de energia oriunda de combustível fóssil em todo mundo totalizou 97TWh e em 2017 passou a 43.460TWh (RITCHIE e ROSER 2017), com isso, seriam necessários trinta minutos de energia solar para substituir a dependência de combustíveis fósseis anual do planeta por fotovoltaica.

Figura 4.2: Terra à noite



Fonte: Autor, 2021.

O funcionamento dos sistemas fotovoltaicos consiste na geração de campos eletromagnéticos a partir da transferência de elétrons entre duas lâminas à base de Silício (Si). Os átomos de Si se caracterizam por possuírem quatro elétrons de ligação, formando uma rede cristalina conectada a outros quatro átomos vizinhos. Na primeira lâmina, introduz-se na liga um átomo de Fósforo (P), com cinco elétrons. Este excedente de elétrons, ao ser estimulado pela energia termal dos fótons, transita para outra camada denominada banda de condução, tornando-a positiva. Isso faz com que P seja um átomo dopante do sistema. Na outra lâmina, utiliza-se como dopante o Boro (B), com três elétrons de valência ligado ao Si, gerando uma lacuna que busca a captura do elétron livre. A diferença de potencial neste campo, conhecido como zona de depleção, cria uma barreira natural entre as duas lâminas, impedindo a circulação dos elétrons entre os dois materiais. (MORAES, 2020; PINHO E GALDINO, 2014). Como resultante da geração deste campo, cria-se uma corrente contínua. Esta energia gerada no sistema é conduzida para um inversor de frequência que transforma a corrente contínua em alternada, uma vez que esta é padronizada pelas distribuidoras de energia e a torna apta a ser transportada para alimentar equipamentos elétricos.

Segundo Bühler *et al.* (2018), os módulos fotovoltaicos são divididos em três gerações. A primeira, mais popular e longa no mercado, é configurada pelos de Silício Monocristalino (m-Si), com custo de fabricação mais elevado, maior peso e

melhor eficiência – 25% – e os de Silício policristalino (p-Si), mais leve, barato e menos eficiente que o m-Si – 20% –, no entanto ambos apresentam vida útil de aproximadamente 20 anos.

Na segunda geração de módulos estão os filmes finos, principalmente compostos pelo Telureto de Cádmio (CdTe) cerca de 100 vezes menos espesso que os m-Si e p-Si, o que o torna mais leve, fácil de transporte e instalação. Esta tecnologia se destaca diante das p-Si e m-Si por apresentar menor custo da produção e elevados índices de absorção de luz, no entanto, com uma redução acentuada da eficiência energética no primeiro ano de 18% para 10%. Também vale ressaltar que os elementos Cádmio e Telúrio empregados na sua produção são nocivos ao meio ambiente.

A terceira geração conta com módulos compostos por células orgânicas, que se destacam pela leveza, maleabilidade, baixo custo de fabricação e utilização de materiais não poluentes. Apesar dos seus índices de eficiência transitarem em torno de 10%, poderão num futuro próximo reduzir a dependência de exploração mineral para o desenvolvimento de módulos fotovoltaicos.

## **4.2 A sistematização dos estudos solares**

Em face da constante evolução tecnológica de uso dos elementos químicos e dos processos físicos que tangem a conversão de luz em energia, surgem os estudos de modelagem solar. Segundo Soares-Filho (1999) o vertiginoso avanço das técnicas computacionais registrado nas últimas décadas, em destaque os instrumentais de análises voltadas para o mapeamento, análise e representação da Terra, atribuíram aos Sistemas de Informação Geográfica (SIG) a habilitação para conduzir estes estudos. Justamente na década de 90 que emergem modelos algoritmos, softwares e aplicações práticas, como Dubayah e Rich (1995) e Schaab e Lenz (1998).

Baseado em modelos físicos e matemáticos embarcados, o SIG atua como um facilitador nestas pesquisas espaciais relacionadas a recursos energéticos renováveis, principalmente no que compete à solar, uma vez que neles é possível integrar inúmeras camadas de dados georreferenciados, como topografia, uso e

cobertura da terra, dentre outros, com algoritmos de irradiação para obter respostas rápidas do potencial energético local.

O principal deles, *hemispherical viewshed* (RICH, 1990; RICH *et al.* 1994; FU e RICH 2000), compreende um conjunto de soluções contidas no software ArcGIS para calcular, a partir de modelos tridimensionais, a radiação global incidida na superfície. Segundo Rød (2020), para executar os cálculos de irradiação, são necessários quatro passos. O primeiro, consiste na identificação das visadas de uma superfície apontadas para o nadir. Nele, o algoritmo dispara, a partir do centróide, uma série de vetores cardeais por 360°, o que busca delinear a linha do horizonte e os obstáculos do MDS para identificar as áreas visíveis e não visíveis à irradiação direta, conforme a posição do sol. De acordo com Huang e Fu (2009), esta componente MDS é a mais importante na concepção do algoritmo.

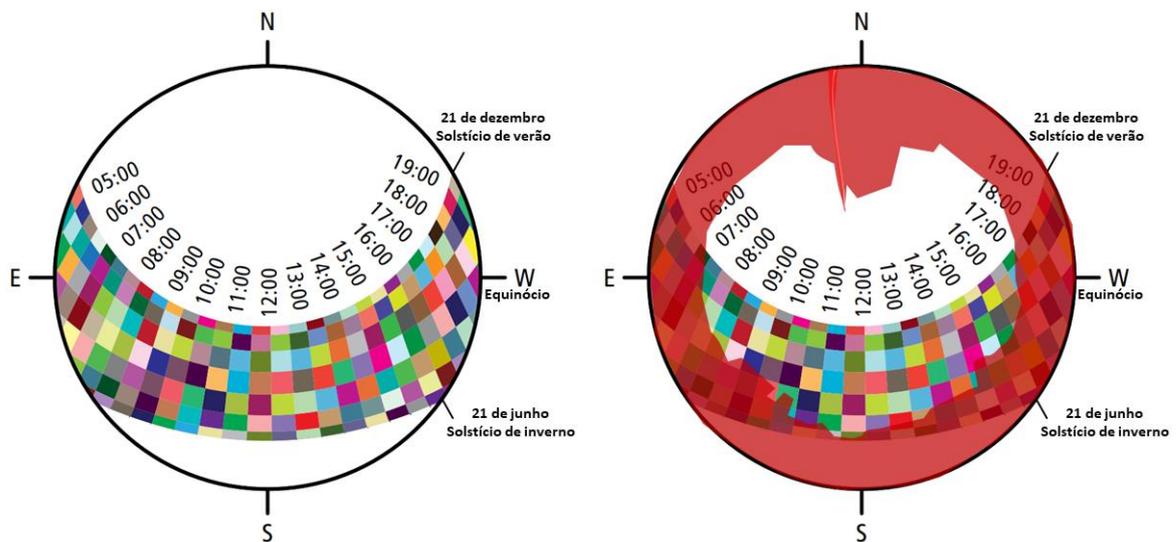
Figura 4.3: Esquema de visada 360° do *hemispherical viewshed* (*fisheye*) para definição da linha do horizonte.



Fonte: Imagem *fisheye*: Dark Sky Defenders, 2020. Organização do esquema lógico: Autor, 2021

O próximo passo consiste na combinação do resultado obtido no *hemispherical viewshed* com o *Sunmap* – um mapa esférico que contém as linhas de passagens do sol, que varia conforme a latitude do local avaliado. No *Sunmap*, cada linha representa uma posição do sol num intervalo de 14 dias. Nele, é possível identificar os períodos de maior e menor incidência de luz – solstícios. As colunas representam o intervalo de tempo de 30 minutos. Após a combinação com o *Hemispherical viewshed*, é possível verificar qual época do ano e horário a célula do MDS avaliada receberá irradiação direta (Figura 4.4).

Figura 4.4: Sunmap e combinação do resultado obtido no *Hemispherical viewshed* de um ponto na latitude 45°S.



Fonte: ArcGIS User guide ESRI, 2009. Adaptação dos dados: Autor, 2021

A radiação direta deste mapa é obtida por meio da equação:  $Dir_{tot} = \sum Dir_{\theta,\alpha}$  para cada um dos setores observados na área fora do *Hemispherical viewshed* (ESRI, ArcGIS User guide):.

$$Dir_{\theta,\alpha} = S_{Const} * \beta^{m(\theta)} * SunDur_{\theta,\alpha} * SunGap_{\theta,\alpha} * \cos(Angr_{\theta,\alpha})$$

Onde:

- $S_{Const}$  – Constante de 1.367 W/m<sup>2</sup> que representa o fluxo solar fora da atmosfera segundo o *World Radiation Center* (WRC);
- $\beta$  – Índice de médio de transmissividade da atmosfera na direção zenital;
- $m(\theta)$  – Comprimento óptico entre a superfície terrestre e o vetor zenital de irradiação. Em casos de ângulos menores que 80°, utiliza-se a equação:

$$m(\theta) = \text{EXP}(-0.000118 * \text{Elev} - 1.638 * 10^{-9} * \text{Elev}^2) / \cos(\theta)$$

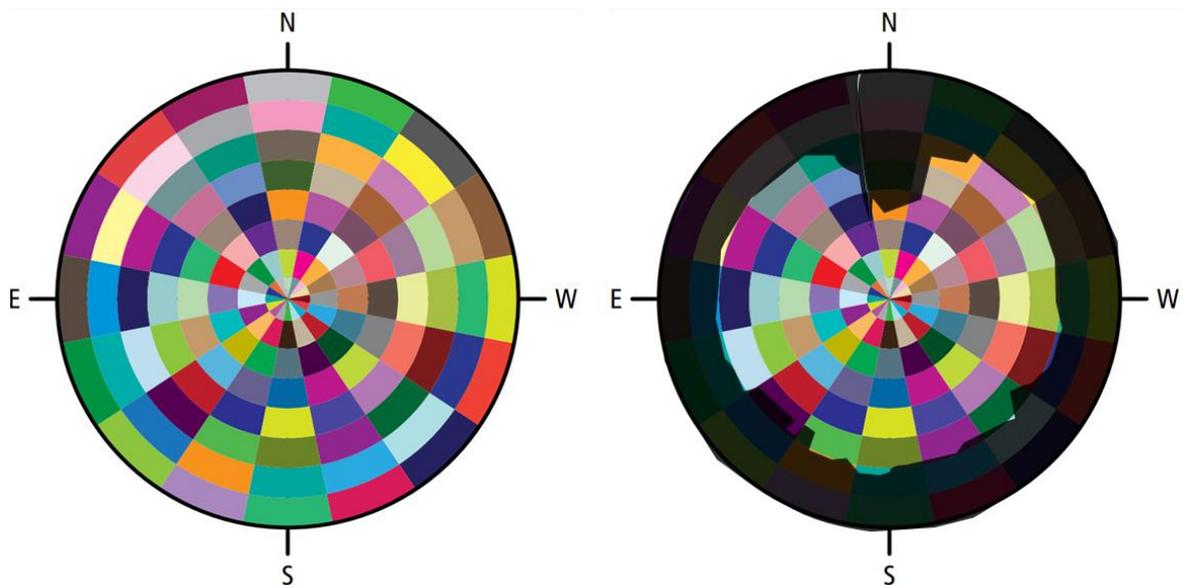
Onde  $\theta$  é o ângulo solar e Elev a cota acima do nível do mar;

- $SunDur_{\theta,\alpha}$  – A duração da exposição de luz baseado no mapa *sky sector*, que varia conforme a posição solar na linha do horizonte.
- $SunGap_{\theta,\alpha}$  – Fração a obtida do mapa de setores.

- $\text{AngIn}_{\theta,\alpha}$  – O ângulo de incidência entre o centróide do *sky sector* e o eixo normal da equação:  $\text{AngIn}_{\theta,\alpha} = \text{acos}((\text{Cos}(\theta) * \text{Cos}(G_z) + \text{Sin}(\theta) * \text{Sin}(G_z) * \text{Cos}(\alpha - G_a))$  onde  $\theta$  é ângulo zenital da superfície e  $G_a$  é o azimute da superfície.

Após a validação da radiação direta sobre a célula avaliada, verifica-se a radiação difusa com o *Skymap*. Este modelo é representado por uma esfera com 16 setores e oito circunferências e recebe o delineamento do MDS oriundo do *hemispherical viewshed*. Quanto maior o quantitativo de geometrias fora da poligonal hachurada, maior será a radiação difusa (Figura 4.5).

Figura 4.5: Modelo *Skymap* e combinação do resultado obtido no *Hemispherical viewshed*.



Fonte: ArcGIS User guide ESRI, 2009. Adaptação dos dados: Autor, 2021

No *Skymap*, o valor de cada setor é obtido a partir da equação (ESRI, ArcGIS User guide):

$$\text{Dif}_{\theta,\alpha} = R_{\text{glb}} * P_{\text{dif}} * \text{Dur} * \text{SkyGap}_{\theta,\alpha} * \text{Weight}_{\theta,\alpha} * \text{cos}(\text{AngIn}_{\theta,\alpha})$$

Onde:

- $R_{\text{glb}}$  – Constante de radiação global;
- $P_{\text{dif}}$  – Fluxo de radiação difusa que deverá ser informado pelo operador: 0.2 para condições de céu claro e 0.7 para condições de céu nublado;

- Dur – Intervalo de tempo de luz no setor;
- SkyGap $_{\theta,\alpha}$  – Proporção de visibilidade do céu em cada setor.
- Weight $_{\theta,\alpha}$  – Proporção da radiação difusa oriunda do mapa de setor do
- AngIn $_{\theta,\alpha}$  – Ângulo de incidência formado entre o centróide do setor e o MDS

Por fim, o último passo é a soma dos resultados de radiação direta e difusa para obtenção da energia irradiada sobre o ponto analisado. Assim que finalizado, o processo é repetido nas células vizinhas até que a área de interesse seja completamente mapeada. Com isso, torna-se possível quantificar a irradiação de qualquer MDS georreferenciado, além de estabelecer as relações de topografia com incidência para melhores práticas de dimensionamento energético.

### 4.3 Referências

ARCGIS USER GUIDE - <<https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/modeling-solar-radiation.htm>> Data de acesso: 11/06/2020.

BÜHLER, A. J. *et al.* - Uma Revisão Sobre as Tecnologias Fotovoltaicas Atuais. VII Congresso Brasileiro de Energia Solar. Gramado, 2018. Disponível em: <<https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/267/267>> Data de acesso: 11/12/2020.

CHU, E. & TARAZANO, L. - **A Brief History of Solar Panels**. Disponível em: <<https://www.smithsonianmag.com/sponsored/brief-history-solar-panels-180972006/>> Data de acesso: 02/01/2021.

DUBAYAH, R. & RICH, P. - Topographic solar radiation models for GIS. **International Journal of Geographical Information Systems**. V. 9(4), 1995. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/02693799508902046>> Data de acesso: 10/01/2021.

FU, P. - **A Geometric Solar Radiation Model with Applications in Landscape Ecology**. Ph.D. Thesis, Department of Geography, University of Kansas, Lawrence. 2000.

FU, P. & RICH, P.M - **The Solar Analyst 1.0 Manual**. Helios Environmental Modeling Institute, Kansas. 2000. Disponível em: <[http://professorpaul.com/publications/fu\\_rich\\_2000\\_solaranalyst.pdf](http://professorpaul.com/publications/fu_rich_2000_solaranalyst.pdf)> Data de acesso: 11/12/2020.

GRIMONI, J. - **Energia Solar Fotovoltaica**. Universidade de São Paulo. 2019. Disponível em: <<http://paineira.usp.br/sisea/wp-content/uploads/2019/03/Energia-Solar-Fotovoltaica-pme3561.pdf>> Data de acesso: 11/12/2020.

HUANG, S. & FU, P, - **Modeling Small Areas Is a Big Challenge**. 2009 Disponível em: <<https://www.esri.com/news/arcuser/0309/files/solar.pdf>> Data de acesso: 28/12/2020.

JÄGER, K. *et al.* - **Solar Energy Fundamentals, Technology, and Systems**. Delft University of Technology. 420p. 2014.

JONES, G. & BOUAMANE, L. - **“Power from Sunshine”: A Business History of Solar Energy**. Working Paper. Harvard Business School. 88p. 2012. Disponível em: <<https://www.hbs.edu/ris/Publication%20Files/12-105.pdf>> Data de acesso: 11/12/2020.

MATEJICEK, L. - **Assessment of Energy Sources Using GIS**. Prague, Institute for Environmental Studies Charles University. 333p. 2017. SZABÓ, L. The History of Using Solar Energy. International Conference on Modern Power Systems (MPS). IEEE, Romania, 2017. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7974451>> Data de acesso: 25/03/2020.

PINHO, J. T. & GALDINO. M. A. - **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. CEPEL. Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <[http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual\\_de\\_Engenharia\\_FV\\_2014.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf)> Data de acesso: 25/03/2020.

RALPH DUBAYAH & PAUL M. RICH - **Topographic solar radiation models for GIS** <<https://www.tandfonline.com/loi/tgis19>> Data de acesso: 12/01/2021.

RICH, P.; DUBAYAH, R. C.; HETRICK, W. & SAVING, S. - **Using viewshed models to calculate intercepted solar radiation: applications in ecology**. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing Technical Papers. p. 524-529, 1994. Disponível em: <[http://professorpaul.com/publications/rich\\_et\\_al\\_1994\\_asprs.pdf](http://professorpaul.com/publications/rich_et_al_1994_asprs.pdf)> Data de acesso: 12/05/2020.

RITCHIE, H. & ROSER, M. - **Fossil Fuels**. Disponível em: <[https://ourworldindata.org/fossil-fuels?utm\\_content=link5#licence](https://ourworldindata.org/fossil-fuels?utm_content=link5#licence)> Data de acesso: 21/01/2021.

RØD, J. K. – **Solar Radiation**. Department of Geography, NTNU. Créditos: GIS - Tools to understand the world. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=wUjy63CsaSk&t=190s>>. Data de acesso: 03/01/2021.

SCHAAB, G. & LENZ, R. - Modeling solar radiation within a GIS: the 'Solar Radiation Model' (SORAM). Geo-Information System, v. 1(4) p8-14, 1998.

SOARES-FILHO, B. - Sensoriamento remoto, SIG e ecologia de paisagem: A importância dos modelos de simulação computacional no estudo de fenômenos e mudanças ambientais. Revista do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas

Gerais. n.4 v.12, 1999. Disponível em:  
<<https://seer.dppg.cefetmg.br/index.php/revista-et/article/view/257>> Data de acesso:  
11/01/2021.

SZABÓ, L. - **The History of Using Solar Energy. International Conference on Modern Power Systems (MPS)**. IEEE, Romênia, 2017. Disponível em:  
<<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7974451>>. Data de acesso:  
21/05/2020.

## CAPÍTULO 5. MATERIAIS, MÉTODOS, COLETA E PROCESSAMENTO DE DADOS

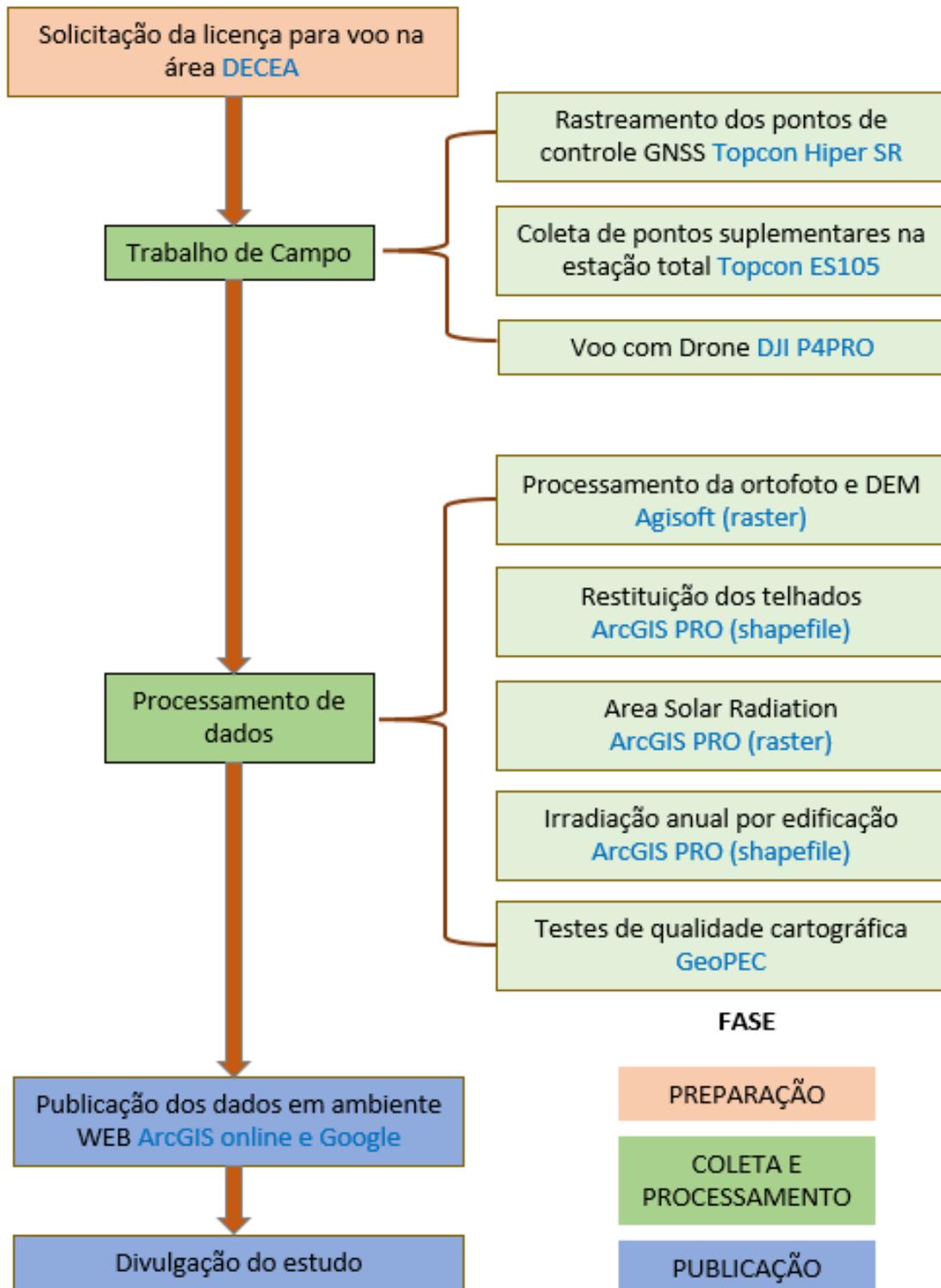
Neste capítulo, são apresentados e caracterizados os equipamentos utilizados na coleta de dados, os procedimentos técnicos e quais processos concomitaram na consolidação do projeto (Figura 5.1), que foi subdividido em três fases:

- Preparação da área de estudo;
- Coleta e processamento de dados;
- Publicação dos resultados em ambiente WebGIS.

Devido à natureza do projeto de coleta de dados, foram utilizados equipamentos eletrônicos diversos, com o propósito de processar e integrar as informações espaciais com alto desempenho de hardwares. Foram eles:

- 1 Estação total Topcon sem prisma, modelo GM-105 (acurácia de 2mm e alcance de 1000 m);
- 1 par de GNSS Topcon Hiper SR L1 L2 pós processado;
- 1 Drone da marca DJI, modelo Phantom 4 PRO, inscrição PP-020021982;
- 1 trena de 2 metros;
- 1 bipé para apoiar o prisma;
- 1 bastão com 2m de altura para apoiar o GNSS *rover* e prisma;
- 1 tripé de alumínio para apoiar a base do GNSS e a estação total;
- 1 Desktop Dell i7 3600GHz, SSD 1 TB, 32MB de memória RAM e placa de vídeo NVIDIA 1060 GTX;
- *Software* Agisoft Metashape PRO, versão 1.7;
- *Software* Google Earth PRO, versão 7.3.3
- *Software* ArcGIS PRO, versão 2.6;
- *Software* Topcon Tools, versão 8.2.3;
- *Software* Geopac versão 3.5.1
- Pacote Microsoft Office 365;
- 2 kg de cal em pó para sinalização em solo.

Figura 5.1: Fluxograma do projeto.



Fonte: Autor, 2021

## 5.1 Preparação da área de estudo

Esta etapa consistiu na delimitação da poligonal de voo em Picinguaba, subsidiada pelo software Google Earth Pro 7.3.3, que possui acervo de imagens com resolução espacial suficientemente apta para detecção visual da área urbanizada. O procedimento é fundamental para solicitar a autorização de voo junto ao Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), no qual coordenadas de pouso e decolagem, altura de voo e raio de cobertura são informados para que o sistema de Solicitação de Acesso de Aeronaves Remotamente Pilotadas (SARPAS) possa verificar a interferência da operação pretendida com o tráfego aéreo local.

O levantamento ocorreu em uma extensão de área de 40 hectares, ou 0,4 km<sup>2</sup>, a uma altura de 360 pés, ou 110 metros, em relação ao nível do terreno e raio de 500 metros em relação ao ponto de decolagem. Foi classificada como *Visual Line-Of-Sight* (VLOS), que deve ocorrer em condições meteorológicas visuais, com constante contato visual direto com a aeronave, sem auxílio de outros operadores, lentes e demais equipamentos, conforme normativa do Departamento do Controle do Espaço Aéreo do ano de 2019<sup>3</sup>.

Após o parecer do órgão, iniciou-se o deslocamento até a área para a sinalização dos pontos de controle em solo, ou pontos de apoio suplementar, e rastreamento com os GNSS. Estas marcações podem ser extraídas de geometrias existentes em solo, facilmente perceptíveis nas ortofotos, como sinalizações no asfalto, mosaicos em calçadas ou geometrias bem definidas e contrastantes. Também podem ser implantadas com marcadores artificiais, como placas sinalizadoras ou pinturas no solo. Para Picinguaba, utilizou-se a cal em pó, por ser um material que se lixivia facilmente com a chuva, e devido à sua pequena quantidade empregada, não apresenta danos ao solo e recursos hídricos. No entanto, em alguns casos foi possível utilizar alvos naturais, como pisos de cerâmica bem definidos no solo (figura 5.2).

---

<sup>3</sup> Portal do DECEA. <https://ajuda.decea.mil.br/base-de-conhecimento/qual-a-diferenca-entre-operacao-de-drone-vlos-e-evlos/>

Cada marcação foi rastreada com o equipamento GNSS Topcon Hiper SR<sup>4</sup> dupla frequência (L1 e L2) com acurácia horizontal de 3mm + 0.5 pmm e vertical de 5mm + 0.5 pmm. O método utilizado foi o Pós Processado, no software Topcon Tools 8.2.3, a partir da implementação de uma base que foi corrigida com a estação UBA1, código 99550, da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RMBC). O tempo de rastreamento de cada ponto *rover* foi de aproximadamente 10 minutos e da base aproximadamente 9 horas, que possibilitou desvio padrão médio de todas as observações em 0,004 m para as coordenadas X e Y e 0,006 m para Z.

Figura 5.2: Marcação dos pontos de controle. Esquerda, artificial implementado com cal e direita, geometria existente (piso de cerâmica).



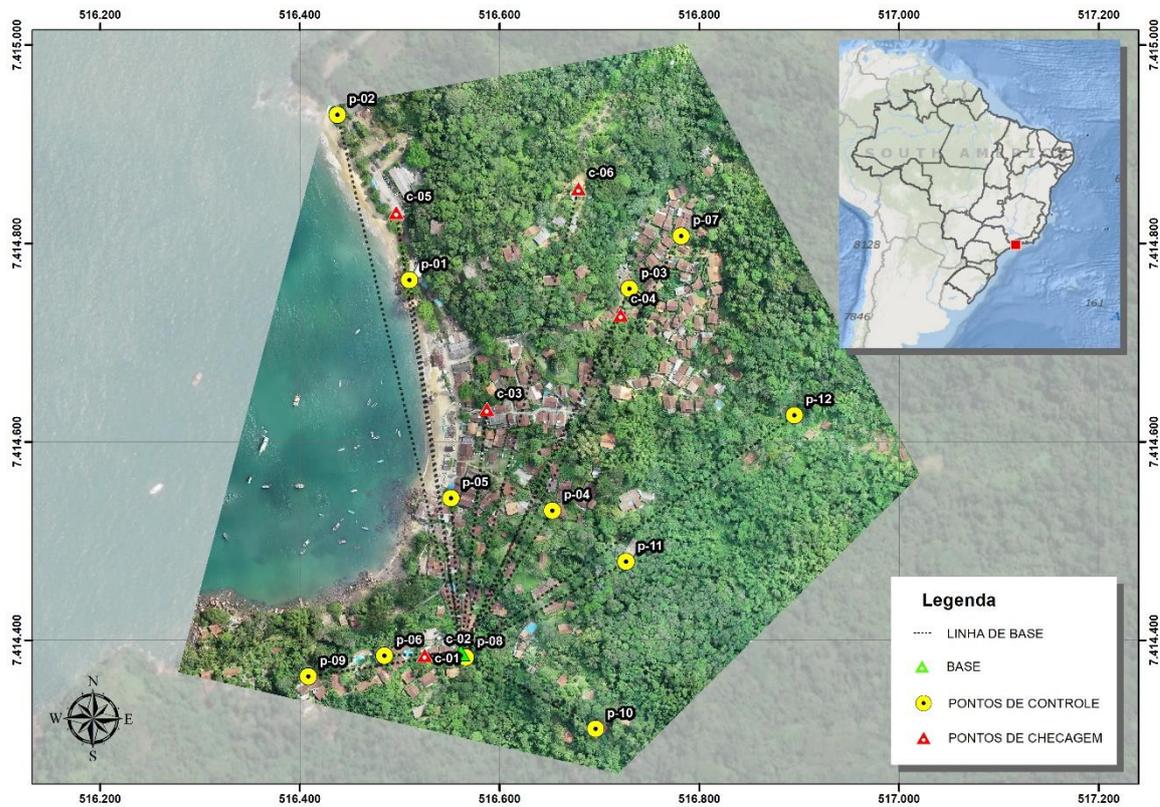
Fonte: Autor, 2020.

No que tange à correção geométrica do ortomosaico, foram distribuídos 12 pontos de controle e 6 pontos de checagem de maneira que as extremidades e o interior da geometria mapeada fossem contemplados de modo equalizado, para minimizar as deformações do bloco (Figura 5.3).

---

<sup>4</sup> Especificações Técnicas do GNNS Topcon Hiper SR.  
[https://www.topcon.co.jp/en/positioning/products/pdf/HiPerSR\\_E.pdf](https://www.topcon.co.jp/en/positioning/products/pdf/HiPerSR_E.pdf)

Figura 5.3: Distribuição dos pontos de controle em Picinguaba.



Fonte: Autor, 2021.

## 5.2 Coleta amostral das feições de telhados

O objetivo desta etapa é exclusivamente voltado para a verificação da qualidade do Modelo Digital de Superfície MDS a partir de observações das quinas de telhados por estação total sem prisma. Devido ao fato do processo de ortorretificação no Agisoft ocorrer sobre o MDS, faz-se necessário verificar como o software trabalha a precisão e acurácia destas feições. Para isso, foi instalado em uma área a 50 metros acima do nível do mar uma estação total modelo Topcon GM-105<sup>5</sup>, com acurácia de 2.0mm+2ppm, capaz de realizar leitura de pontos sem a necessidade de prismas, a partir de pulsos de laser.

<sup>5</sup> Especificações técnicas da Topcon GM-105.

[https://www.topcon.co.jp/en/positioning/products/pdf/GM-100\\_Top-Basic\\_E.pdf](https://www.topcon.co.jp/en/positioning/products/pdf/GM-100_Top-Basic_E.pdf)

Uma das principais razões do emprego deste método se deu por questões de segurança, uma vez que o acesso aos telhados poderia ocasionar riscos de queda, caso os pontos de interesse fossem coletados por métodos de GNSS ou Prisma com bastão. Ressalta-se também que não foi necessário entrar nas residências, preservando assim a privacidade dos moradores, bem como a segurança de saúde, devido ao fato da campanha de campo ter sido realizada nos meses de setembro e outubro de 2020, no período de pandemia do COVID-19.

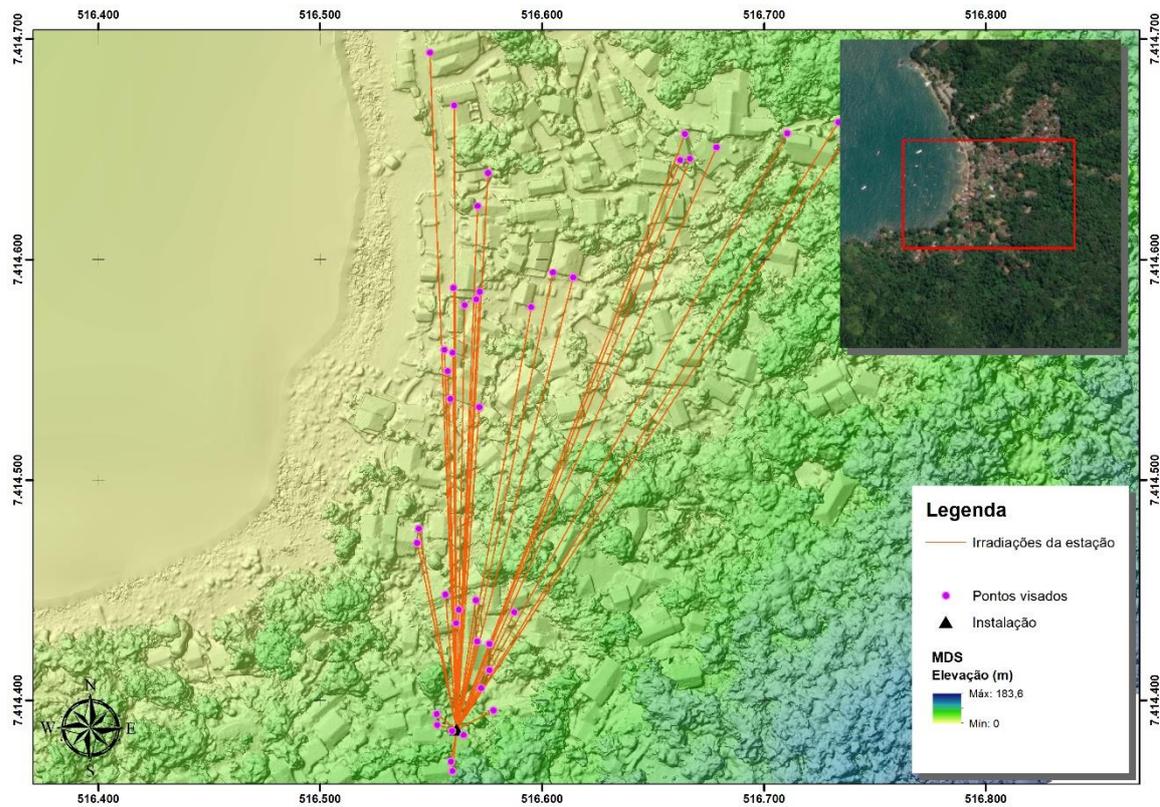
O equipamento foi instalado em uma área aberta e com ampla visibilidade para que grandes quantidades de feições de telhados pudessem ser capturadas, e com isso, suas respectivas coordenadas X, Y e Z obtidas (Figura 5.4). Foi utilizada a técnica de irradiação a partir de uma única instalação, que permitiu identificar 39 alvos. Devido ao longo alcance do sensor laser da estação, foi possível identificar alvos com distâncias superiores a 300 metros (figura 5.5).

Figura 5.4: Ponto de instalação da estação sem prisma.



Fonte: Autor, 2020.

Figura 5.5: Mapa de localização dos pontos coletados a partir da irradiação da estação total.



Fonte: Autor, 2021.

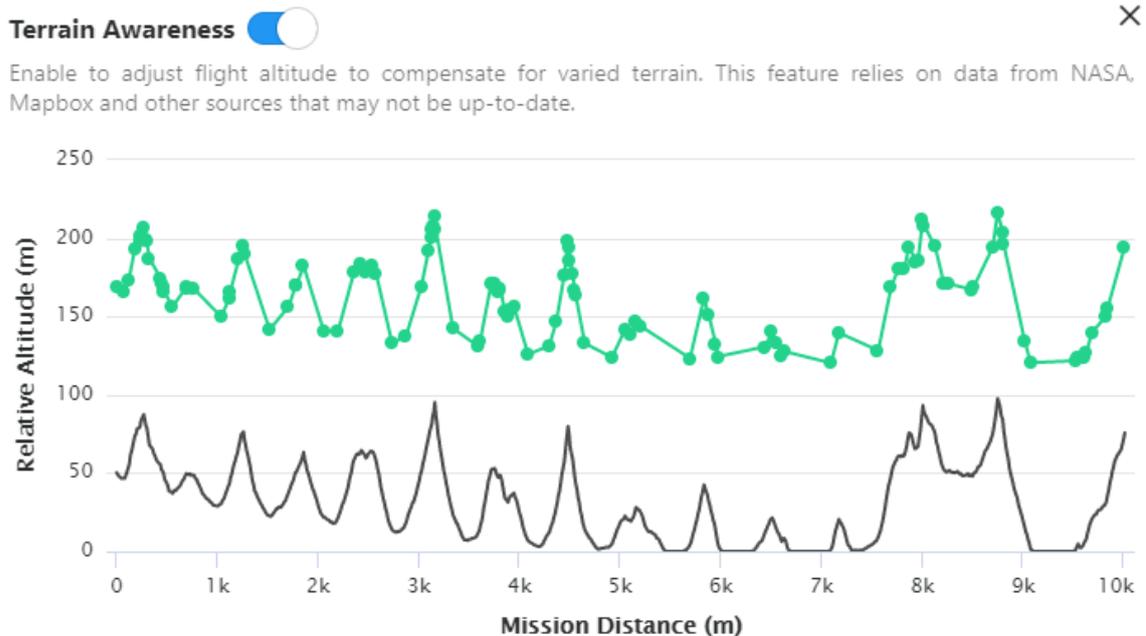
### 5.3 Voo e processamento dos dados

Após a sinalização e leitura dos pontos de controle, iniciou-se o voo para a coleta das ortofotos com o equipamento DJI Phantom 4 PRO, que possui câmera RGB com resolução de 5472 x 3638 *pixels* (20 Mpx) e distância focal de 8 mm, que garantiu um GSD de 2,5 cm à uma altura de 110 metros em relação ao ponto de decolagem. Foi utilizado o aplicativo Drone Deploy, disponível no sistema operacional IOS, para execução do voo de forma autônoma. As sobreposições de imagens laterais foram de 70% e longitudinais de 70%, na posição nadiral, ou seja, a câmera opera no ângulo de 90° em relação ao solo, que totalizou 970 arquivos capturados.

Para garantir que todas as imagens obedecessem a taxa de sobreposição pré-definida, foi utilizada a função de altitude relativa ao solo, nativa do aplicativo, no qual um Modelo Digital de Terreno fornecido pela missão *Shuttle Radar Topography*

*Mission* (SRTM) transfere informações referentes à variação do gradiente da superfície do terreno para a aeronave, de forma que os valores de altitude de voo sejam variáveis conforme avança pelo terreno (Figura 5.6).

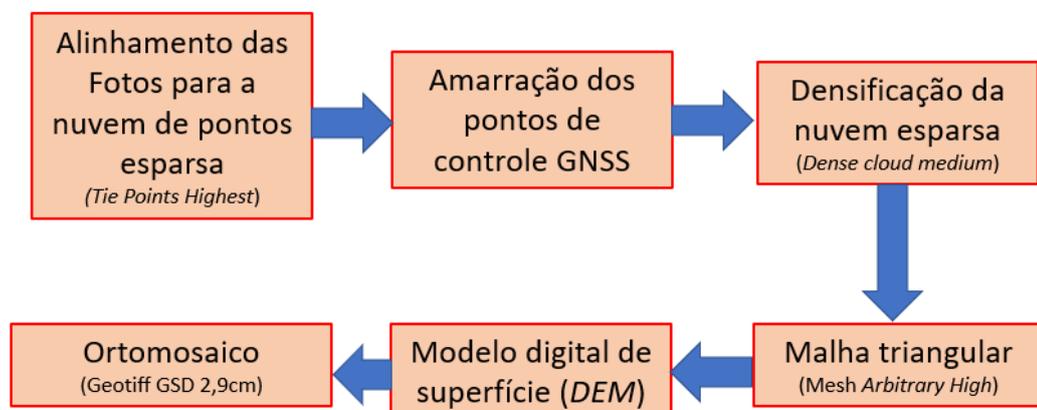
Figura 5.6: Variação do gradiente de altitude de voo conforme o MDT da área de Picinguaba.



Fonte: Drone Deploy, 2020.

As fotos foram carregadas no software Agisoft Metashape PRO, versão 1.7, e seguiram o seguinte fluxograma de processamento:

Figura 5.7: Fluxograma do processamento das ortofotos no Agisoft Metashape PRO.



Fonte: Autor, 2021.

Ressalta-se que os parâmetros de orientação interior da câmera foram autoajustados no software, para minimizar problemas com distorção da lente e posições. Após finalizado o processamento dos dados, obteve-se os quantitativos gerados, tempo gasto em cada operação e cálculos estatísticos da acurácia do modelo fotogramétrico.

Tabela 5.1: Quantitativo final dos dados gerados.

Item	Unidade	Quantidade	Tempo de processamento
<i>Tie Points (highest)</i>	pontos	779.470	2 horas e 39 minutos
<i>Dense cloud (medium)</i>	pontos	89.009.182	2 horas e 50 minutos
<i>Mesh (high)</i>	triângulos	17.801.834	2 horas e 1 minuto
MDS	pixel	12.514 x 13.365 (GSD 10 cm)	3 minutos e 33 segundos
Ortofoto	pixel	36.307 x 34.319 (GSD 2,5)	54 minutos e 9 segundos
<i>RMS reprojection error</i>	pixel	0,0738131 m	---

Fonte: Autor, 2021.

#### 5.4 Restituição

A presente etapa consistiu em vetorizar a projeção das edificações contidas na ortofoto por meio do software ArcGIS PRO (Figura 5.8). Nesta etapa foram restituídas 263 feições de telhados, às quais foram atribuídos identificadores únicos denominados ID. A principal função deste *shapefile* e utilizá-lo como máscara para cortar as áreas de interesse no modelo solar.

Figura 5.8: Telhados restituídos no ArcGIS PRO.

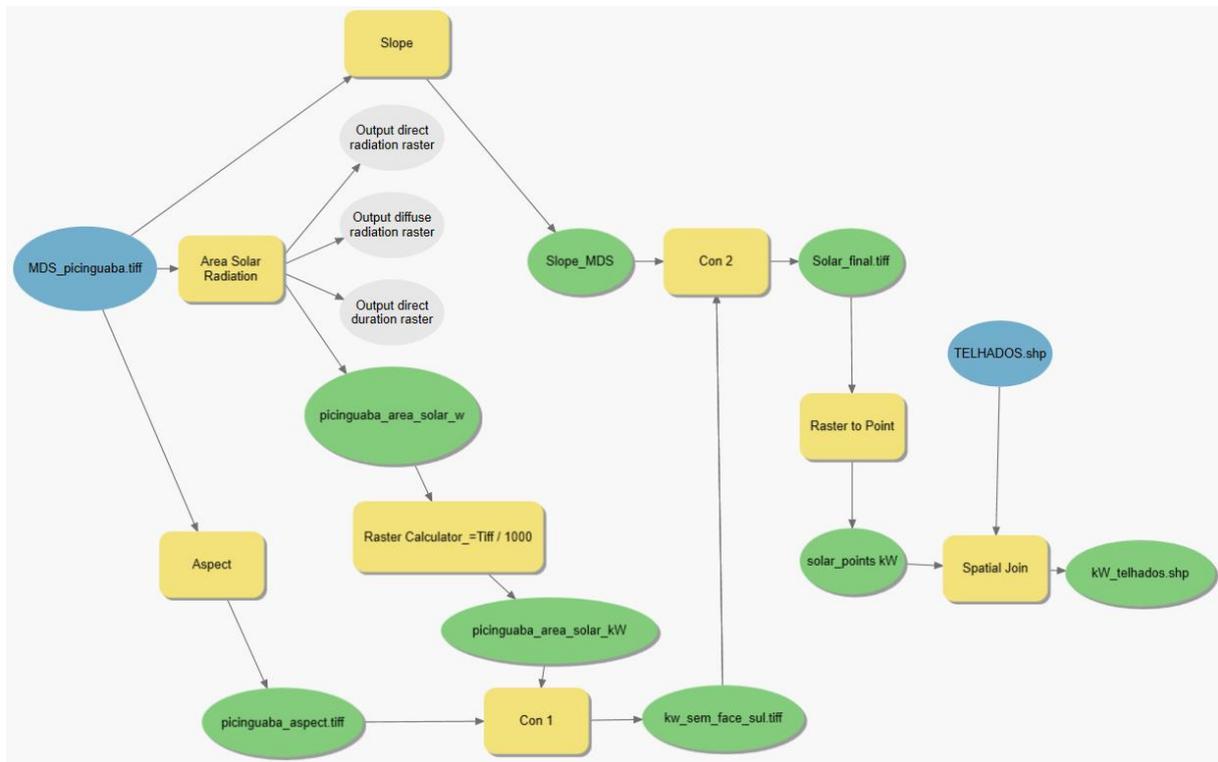


Fonte: Autor, 2021.

## 5.5 Geração do modelo solar

Esta etapa consistiu no cálculo da energia solar incidida sobre o Modelo Digital de Superfície de Picinguaba, com GSD de 10 cm, que pode ser explicado a partir do fluxograma construído no *Model Builder*, ferramenta nativa do software ArcGIS PRO.

Figura 5.9: Estrutura lógica do modelo solar.



Fonte: Autor, 2021.

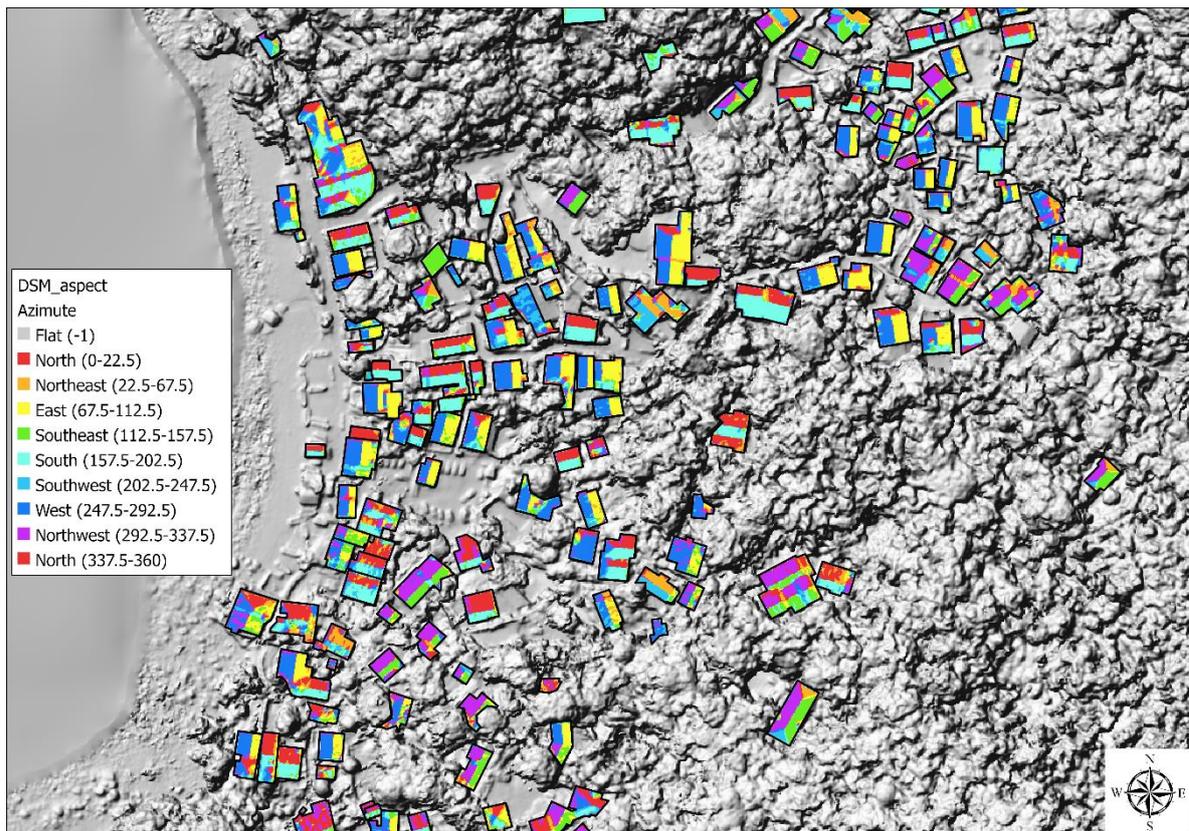
Nele, pode-se destacar na cor azul as entradas de dados, amarelo os algoritmos empregados, em verde, as saídas e as cinzas foram desprezadas por não serem úteis na análise. Foram necessários apenas dois arquivos de entrada, o Modelo Digital de Superfície (MDS) no formato geotiff e a camada vetorial de restituição dos telhados, no formato *shapefile*.

No MDS foram executados três processos. No primeiro, utilizou-se a operação *slope* para identificar a declividade das rampas dos telhados em graus. No segundo, aplicou-se o algoritmo *Area Solar Radiation* sobre todo o MDS para verificar a quantidade média de energia anual, em watts, que cada célula da matriz produziria em condições moderadas de nebulosidade. Foi utilizado como referência o ano de 2020. A terceira e última operação no MDS de entrada foi a extração da orientação azimutal das faces do telhado.

Devido ao fato de a indústria solar trabalhar como unidade de medida principal o kW, foi necessário converter a matriz de saída do modelo solar, que é fornecido somente em watts. Após concluída a operação, a matriz foi submetida à primeira condicional. Segundo Pinho e Galdino (2014), para que ocorra eficiência no

posicionamento dos módulos, faz-se necessário orientar as placas coletoras à linha do equador, com isso, em aplicações no hemisfério sul, as faces opostas devem ser evitadas. Neste contexto, a condicional que exclui as faces Sul dos telhados foi executada. Dos 27.971 m<sup>2</sup> de telhados identificados, 2.607 m<sup>2</sup> estavam orientados ao sul, ou seja, 9,32% de área mapeada foi eliminada do modelo.

Figura 5.10: Mapa de aspecto.



Fonte: Autor, 2021.

A segunda condicionante trabalhou na matriz de declividade e excluiu rampas acentuadas acima de 45°, uma vez que nestas, a incidência de sol é prejudicada em função da redução da área de contato com os vetores de propagação da irradiação. Segundo Nóbrega *et al.* (2018) o ângulo ideal para melhor aproveitamento da incidência solar é o mesmo da latitude, no caso de Picinguaba, seria 23°, que comumente é ajustado com suportes específicos instalados no telhado. De acordo com a análise quantitativa na matriz de declividade, 95,25% da área de telhados mapeada está na faixa de 0° a 45°. Com isso, as rampas que apresentaram valores acima deste gradiente foram eliminadas.

Estas duas matrizes condicionadas foram utilizadas juntamente com o *shapefile* de telhados, como máscaras, para extrair da matriz de irradiação total em kW/m<sup>2</sup> somente este recorte de interesse.

No que tange aos parâmetros do *Area Solar Radiation*, a latitude foi obtida de modo automático, uma vez que o MDS utilizado está georreferenciado. O intervalo de tempo solicitado foi anual, com resultado da irradiação acumulada nas superfícies em todo ano de 2020 (Figura 5.11), porém, também foram solicitados cálculos mensais, que originaram doze distintas matrizes, cada uma correspondente ao montante de irradiação acumulada no mês. As figuras 5.12 e 5.13 representam a irradiação contida em cada célula do MDS nos solstícios de inverno e verão, respectivamente. A resolução do *Sky Size* utilizada foi de 512, que de acordo com o guia do usuário do software ArcGIS PRO, possibilita uma melhora na acurácia dos cálculos realizados, com maior detalhamento de superfícies e obstáculos do MDS e não compromete o tempo de processamento. Outro elemento sugerido pelo guia do usuário e aplicado no estudo, que culmina na melhoria dos resultados obtidos, é a quantidade de subdivisões do Zênite e Azimute, que por *default* está configurada para 8. Segundo o documento, em MDS com maior detalhamento, como o de Picinguaba, recomenda-se os valores máximos de 32 subdivisões.

Os aspectos físicos da luz solar também devem ser avaliados na composição do modelo. Nele é contemplada a taxa de transmissividade atmosférica, correspondente ao montante de irradiação que chega até a superfície da Terra. No software seus valores variam de 0, que corresponde ao nulo, a 1, que representa a máxima transmissão. Em função de não haver instrumentação e dados históricos solares no local, foi mantida por *default* em 0,5. Outro parâmetro que não pôde ser ajustado, uma vez que demandaria instrumentais para calibração correta, é a taxa de radiação difusa. No software ela varia de 0,2, com céu sem nuvem, até 0,7, com céu totalmente coberto. Uma vez que este estudo não tenha contemplado a calibragem com modelos climatológicos de nebulosidade, foi adotada a taxa média correspondente a 0,5.

Ressalta-se que os dados apresentados no software se referem a cada *pixel* da matriz, com isso, em uma mesma edificação pode-se encontrar células que respondem a altos valores de irradiação, bem como valores próximos de zero kW/m<sup>2</sup>. Para equalizar tal evento, faz-se necessário converter cada pixel em ponto no formato *shapefile*. Com isso, seus valores podem ser associados às feições de telhados –

geometria de polígonos – a partir do cálculo de médias da função *join spacial*. Este processo facilita a identificação dos melhores telhados com potencial efetivo de geração de energia fotovoltaica.

Figura 5.11: Mapa da matriz de irradiação acumulada no ano de 2020.

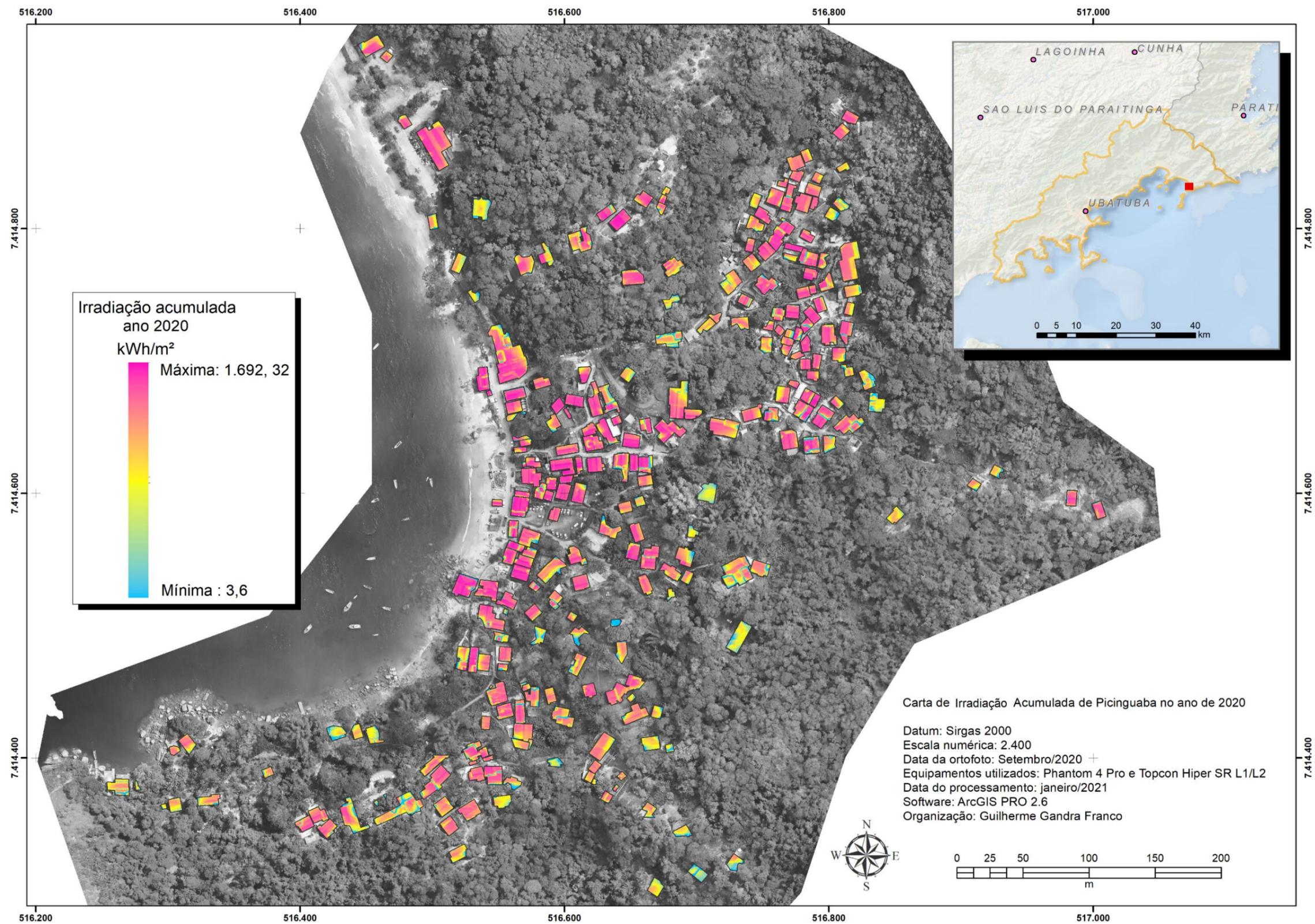


Figura 5.12: Mapa da matriz de irradiação acumulada no mês de junho, solstício de inverno de 2020.

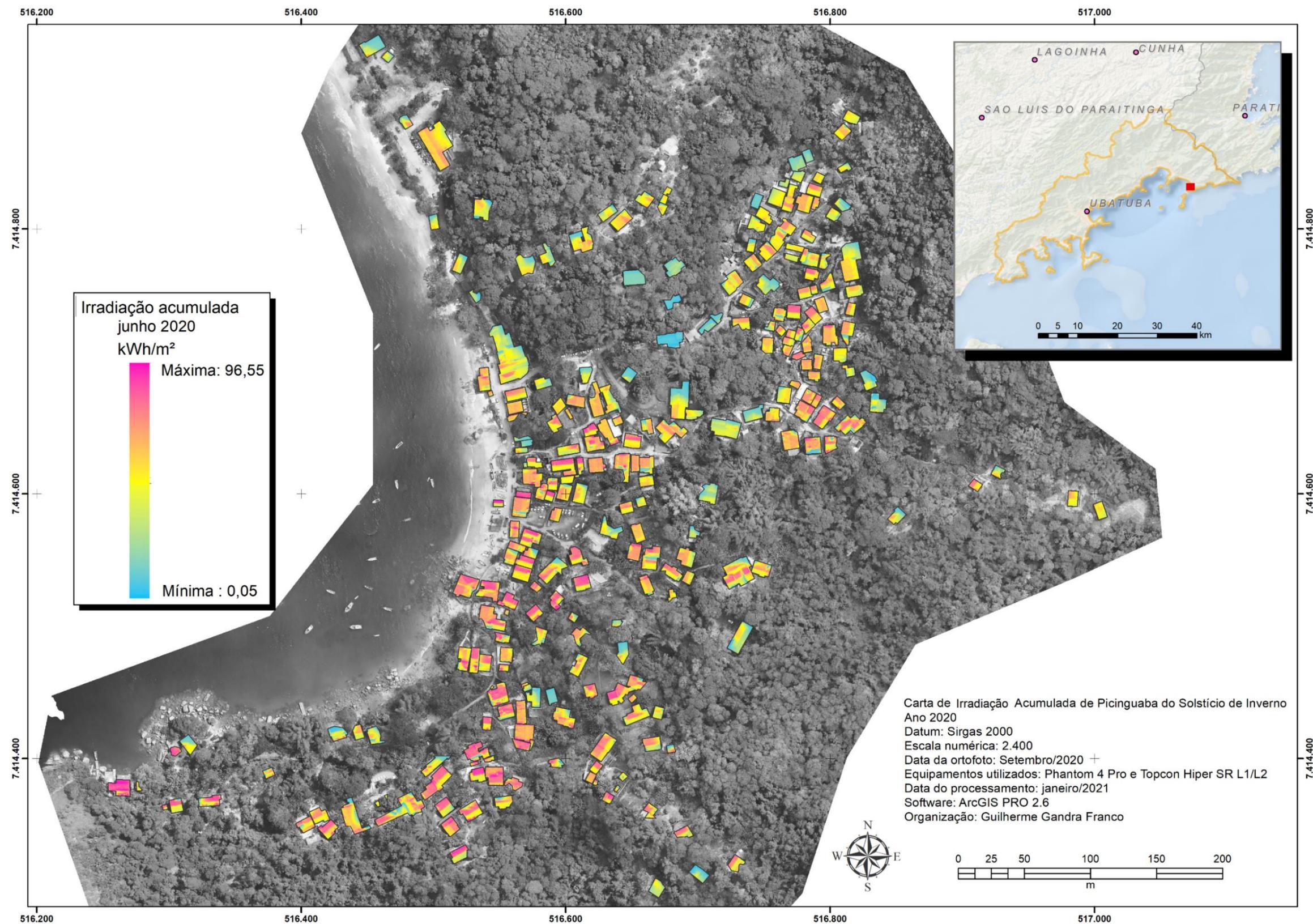
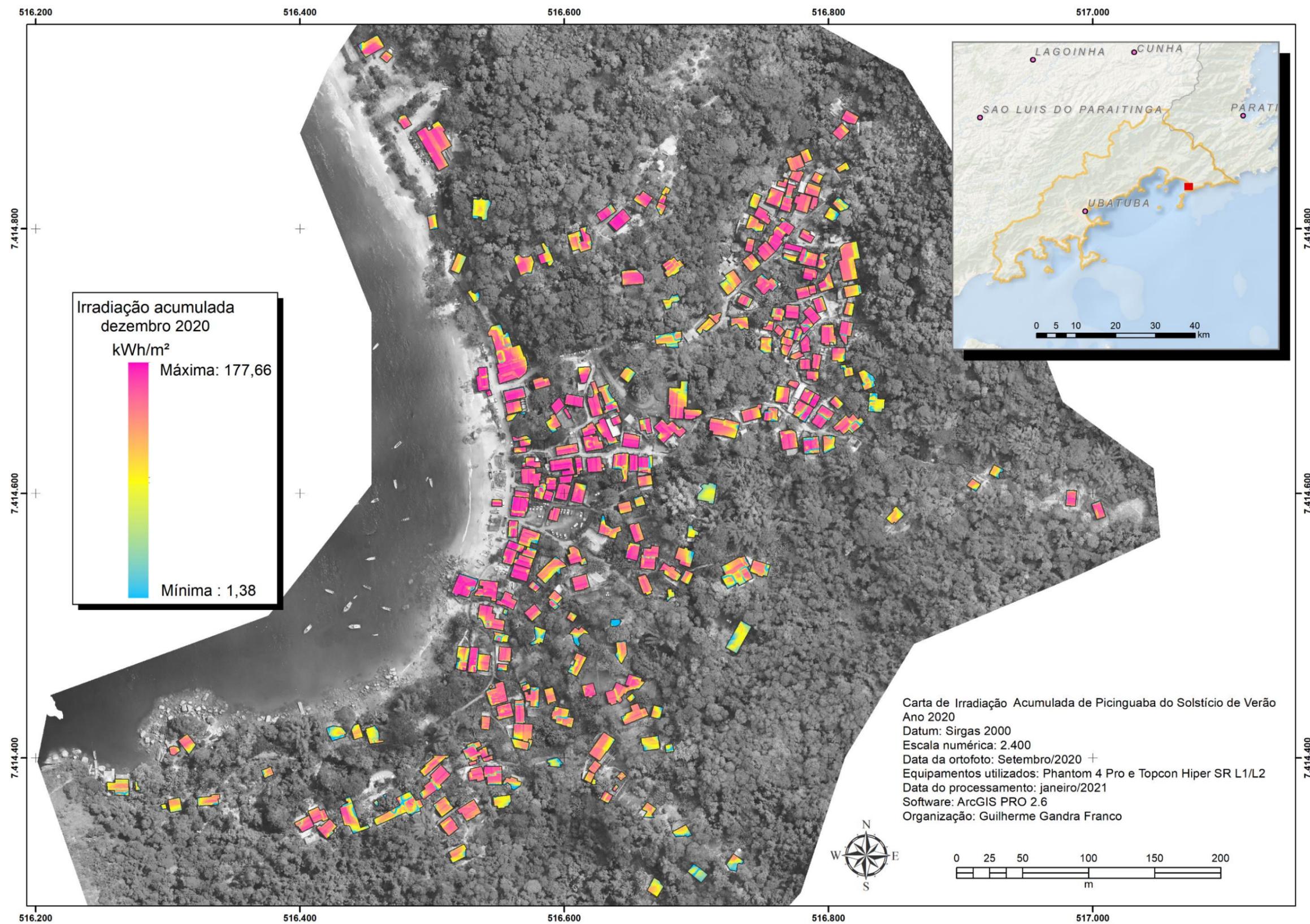


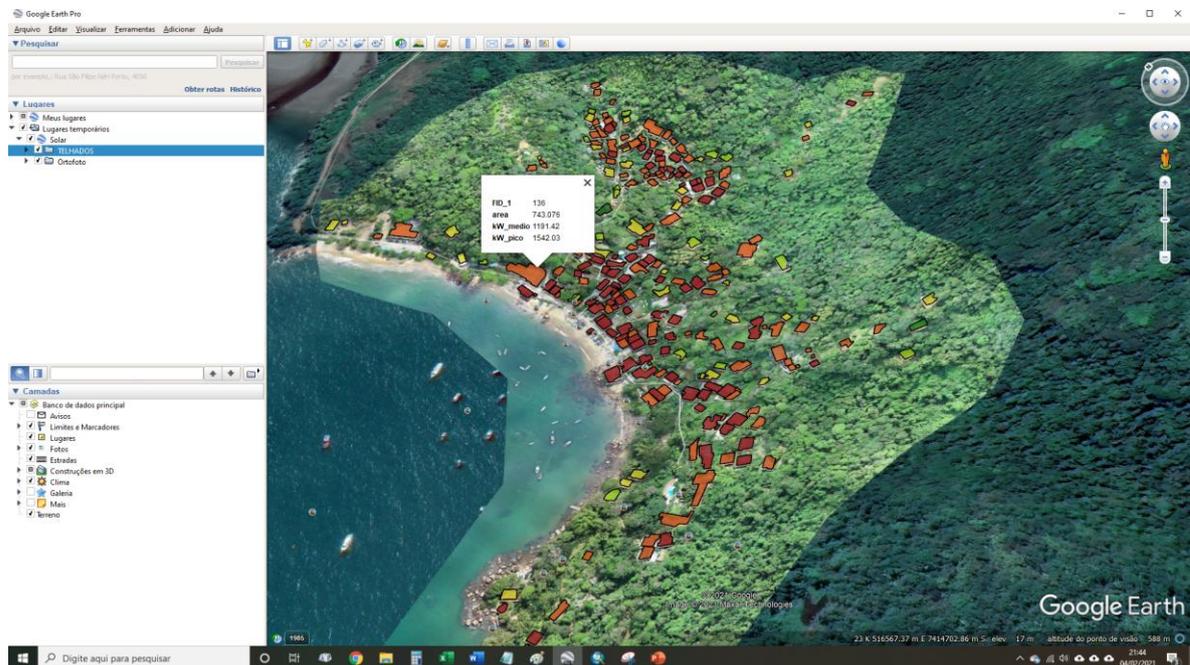
Figura 5.13: Mapa da matriz de irradiação acumulada no mês de dezembro, solstício de verão de 2020.



## 5.6 Publicação

Com o *shapefile* finalizado, utilizou-se a plataforma ArcGIS *online*, do pacote de soluções ESRI, para que os dados pudessem ser publicados e divulgados para a sociedade<sup>6</sup>. Esta plataforma consiste em um ambiente *webmap*, passível de ser manipulado em computadores, *tablets* ou *smartphones*, no qual o usuário consegue navegar e consultar dados geográficos, obter os atributos contidos nas feições e compartilhar a informação, contudo, a plataforma gratuita impossibilitou a publicação da ortofoto de alta resolução. Para contornar este problema, foi produzido também um arquivo no formato kmz para publicação e manipulação no software Google Earth PRO, distribuído gratuitamente pela Google. A distribuição do intervalo de classes foi gerada a partir da classificação por *Sturges*, que identificou 9 diferentes classes representativas de potencial de geração fotovoltaica (Figura 5.15).

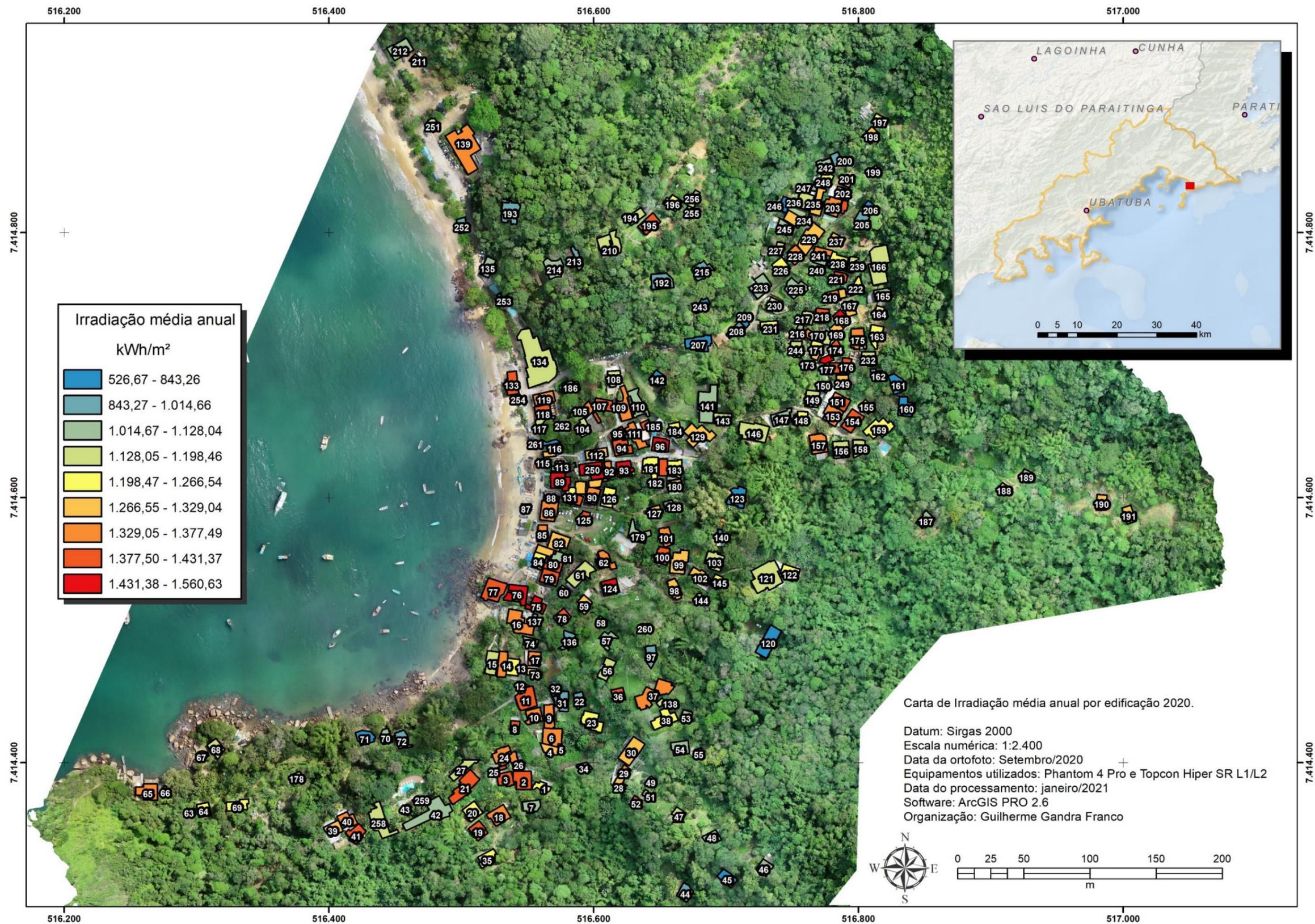
Figura 5.14: Dados publicados no Google Earth PRO.



Fonte: Autor, 2021: [https://1drv.ms/u/s!AoaV\\_Kc3\\_M0bjvsfXBJV6mnvT54nlg?e=oZjHca](https://1drv.ms/u/s!AoaV_Kc3_M0bjvsfXBJV6mnvT54nlg?e=oZjHca)

<sup>6</sup> Link do webmap de Picinguaba no ArcGIS online: <https://arcg.is/1PegDH>.

Figura 5.15: Identificação do potencial de irradiação anual detectada.



## CAPÍTULO 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo estão apresentados os resultados posicionais do MDS e da irradiação nas superfícies dos telhados de Picinguaba, bem como alguns dimensionamentos hipotéticos para avaliar o potencial fotovoltaico do local.

### 6.1 Modelo Digital de Superfície

Apesar do software Agisoft fornecer dados sobre a acurácia do bloco fotogramétrico processado, os parâmetros observados também foram submetidos a testes da norma vigente no Brasil, o decreto 89.817 e Especificações Técnicas de Controle de Qualidade em Dados Geoespaciais de 2016 (ET-CQDG) - da Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais (INDE), no software GeoPEC. Os 39 pontos coletados da estação total e os 5 coletados por GNSS foram tabulados de modo que a acurácia das coordenadas de testagem e de referência na ortofoto pudessem ser verificadas.

Uma planilha no formato txt foi formatada para dar carga no software e todos os 44 pontos foram verificados. O resultado demonstrou que o bloco aerofotogramétrico apresentou parâmetros suficientes para PEC PCD classe A para produtos cartográficos na escala 1:1.000, conforme a figura 6.1, e com isso, a pesquisa pôde prosseguir com os dados produzidos.

Figura 6.1: Resumo da acurácia posicional dos pontos testados

Estatísticas	Este	Norte	Posicional
nº pontos	44	44	44
média	-0,0156	0,013	0,1204
desvio	0,1101	0,1091	0,0981
variância	0,012	0,012	0,010
RMS	0,1099	0,1087	0,1546
máximo	0,2372	0,344	0,3806
mínimo	-0,2907	-0,294	0
curtose	3,826	5,084	2,519
assimetria	0,168	0,279	0,855
soma	0,521	0,512	0,414
nº outliers	-	-	0

Fonte: Geopec, 2021.

No que tange aos resultados encontrados na testagem, apesar do valor RMS de 0,15m viabilizar a melhor classificação do PEC-PCD (1:1000), ficou bem próximo dos 0,17m máximos exigidos pela norma. Um dos motivos dessa atribuição pode ter relação com o fato de que os alvos capturados pela estação total terem sido justamente as quinas dos telhados. Estas formas concentraram maiores distorções, quando comparadas às demais observadas por GNSS, devido ao fato de a metodologia utilizada na coleta demandar áreas abertas sem a presença de obstáculos físicos para uma melhor recepção de sinal oriundo dos satélites. Esta relação de acúmulo dos erros pode ser observada ao se obter o valor de RMS na testagem exclusiva dos seis pontos coletados por GNSS, que totalizou 0,05m.

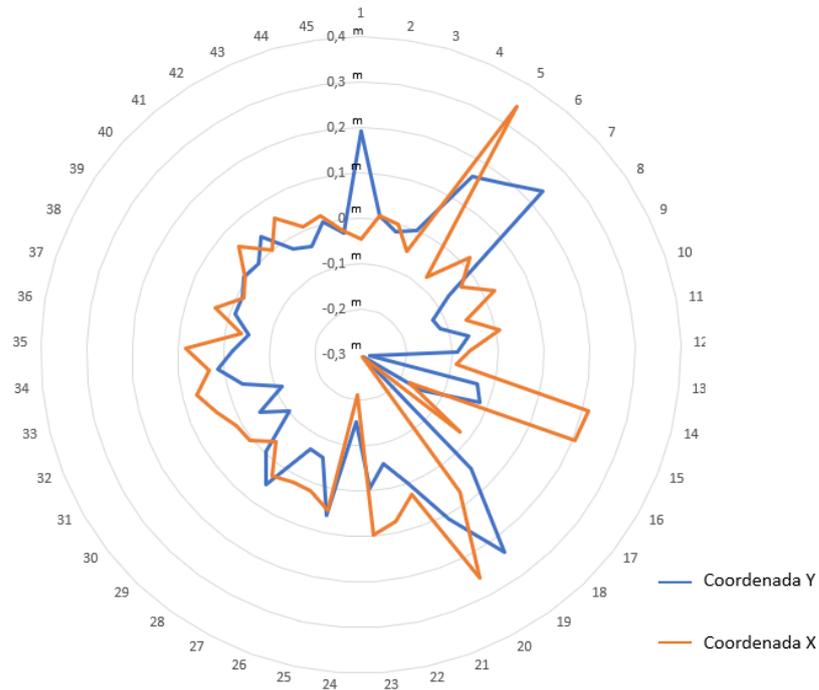
Figura 6.2: Distorção observada nos telhados



Fonte: Autor, 2021

Vale ressaltar também que a mudança da metodologia de coleta dos pontos de checagem posicional, oriundos da estação total (1 a 39), para os coletados por GNSS (40 a 45) é nitidamente perceptível no gráfico 6.1, que avaliou o quantitativo de desvios testados.

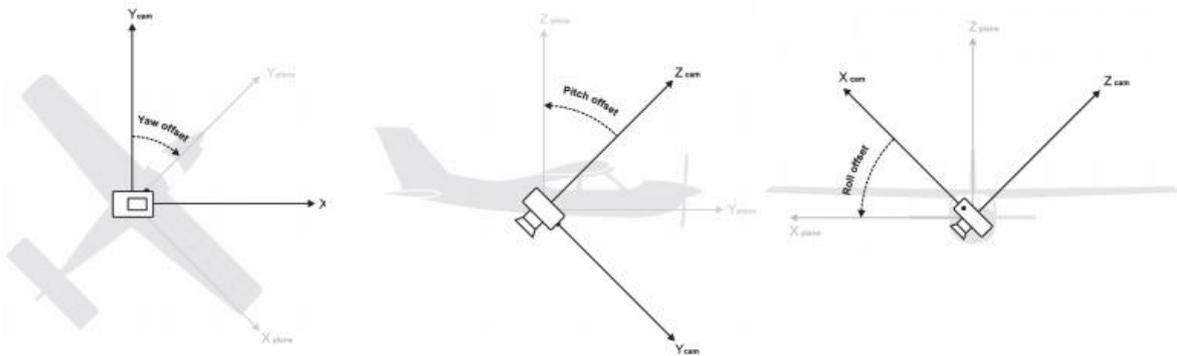
Gráfico 6.1: Erros em X e Y nos 45 pontos testados.



Fonte: Autor, 2021

Estas distorções são atribuídas à própria morfologia física das lentes, que ao convergirem os raios de luz para o CCD podem apresentar refrações que culminam nas deformidades mapeadas, denominadas Distorções Radiais Simétricas (ANDRADE 2003), no entanto, também podem estar relacionadas à inclinação da aeronave no momento da captura da imagem. Apesar do Phantom 4 PRO possuir um *gimbal* de três eixos, cuja função é estabilizar o ângulo de captura da imagem, parâmetros de posição denominados *Yaw*, *Pitch* e *Roll*, bem como os de rotação *kappa*, *ômega* e *phi* ( $\kappa$ ,  $\omega$ ,  $\varphi$ ) devem ser avaliados para checagem do bloco aerofotogramétrico.

Figura 6.3: Parâmetros de orientação exterior.



Fonte: Agisoft Guia do usuário, 2020.

Segundo Jensen (2009), para reconstrução matemática deste feixe alterado, utiliza-se estes seis parâmetros de orientação interior em matrizes de colinearidade, no intuito de recuperar a posição  $X$ ,  $Y$  e  $Z$  do *pixel* mapeado. Para isso, busca-se inicialmente calibrar a distância focal do instrumento nos próprios softwares de fotogrametria, uma vez que a câmera utilizada no *Phantom* é classificada como não métrica, ou seja, são incapazes de serem calibradas em laboratórios.

Apesar do Agisoft ter aplicado métodos automatizados de correção dos parâmetros de orientação interior, ainda assim pôde-se observar estas pequenas distorções no modelo. Uma das limitações constatadas no software, que poderia melhorar o MDS, seria a exposição destes parâmetros da matriz calculados para cada par de cena obtida, para que nos levantamentos com sobreposições laterais e longitudinais elevadas, fosse possível identificar e eliminar do bloco as fotos com piores resultados. De toda forma, as divergências observadas ainda são baixas quando se avalia o propósito de instalar módulos fotovoltaicos nos telhados. Com isso, as estimativas aqui demonstradas podem ser balizadoras para uma seleção das edificações mais favoráveis.

## 6.2 Geração de energia fotovoltaica em Picinguaba

O desempenho individual em kWh/m<sup>2</sup> de cada edificação representada na matriz de irradiação, mesmo com estas pequenas imperfeições posicionais constatadas, identificou uma grande heterogeneidade. Uma das principais razões para este fenômeno são os obstáculos físicos que a irradiação solar encontrou no MDS. Isto pode ser exemplificado na edificação da Escola Municipal Iberê Ananias Pimentel (Id 139), que tem irradiação acumulada de 1.346 kWh por m<sup>2</sup> durante um ano, ao passo que seu vizinho (Id 193), locado a apenas 33 metros de distância da escola, este valor de 927,8 kWh por m<sup>2</sup>, em função do sombreamento da copa das árvores.

Figura 6.4: Influência do sombreamento da copa das árvores.



Fonte: Autor, 2021.

Outro elemento que pode ser considerado é a interferência do sombreamento entre as edificações em cotas diferentes. Este fenômeno pode ser melhor observado

em áreas urbanas verticalizadas, no entanto, pode-se ilustrar esta relação no Id 14, com 1.361,2 kWh/m<sup>2</sup> contra o Id 15, com 1.175,7 kWh/m<sup>2</sup>.

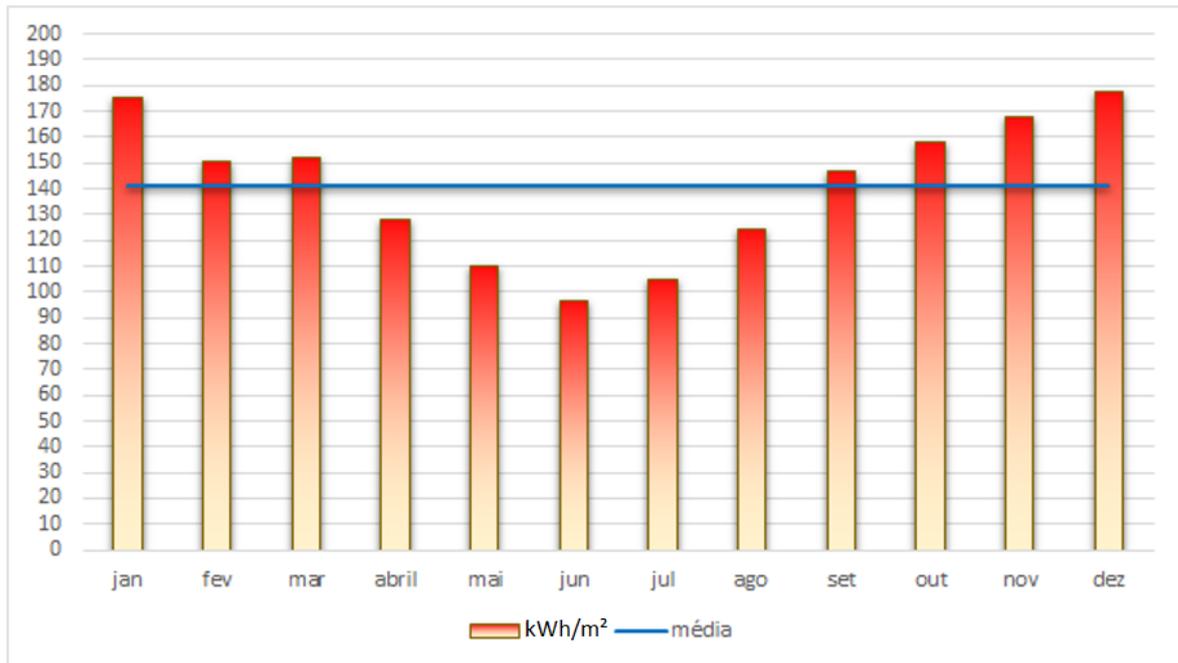
Figura 6.5: Influência do sombreamento de outras edificações.



Fonte: Autor, 2021.

Já no Id 192, o desempenho de 999,8 kWh/m<sup>2</sup> está relacionado ao azimute da rampa do telhado. Mesmo instalado em uma área alta, livre de obstáculos significativos, dos 172 m<sup>2</sup> de projeção da edificação, 118m<sup>2</sup> estão voltados para a direção sul. Se seu projeto arquitetônico estivesse atento à potencialidade de irradiação dos telhados, possivelmente teria admitido outro formato, e com isso, o estudo também alerta projetistas a verificarem que o potencial de geração de energia fotovoltaica possui relevante relação com a disposição dos telhados.

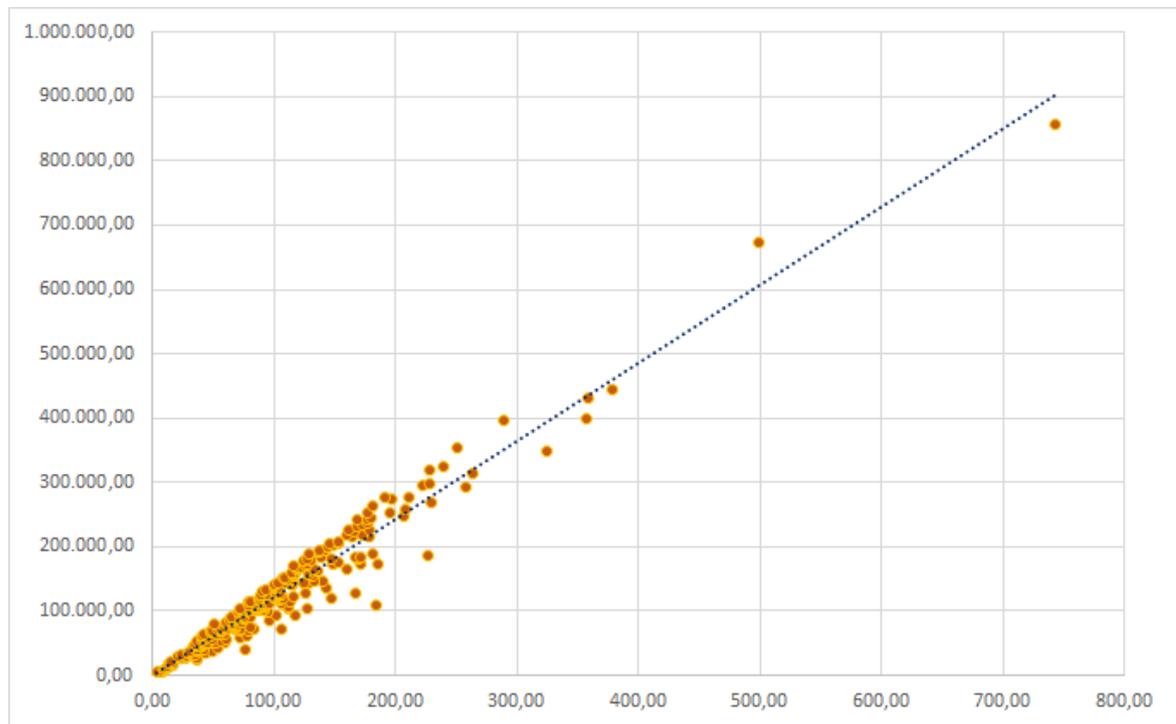
Também vale ressaltar que o acumulado máximo de irradiação ficou em 1.692,32 kWh/m<sup>2</sup>, com pico de 177,6 kWh/m<sup>2</sup> no mês de dezembro e mínimo de 96,6 kWh/m<sup>2</sup> em junho, o que configurou uma significativa amplitude de 81,1 kWh/m<sup>2</sup>, ou seja, 45,7% de variação entre os extremos (gráfico 6.2). Este acontecimento tem relacionamento direto com a posição geográfica da área de estudo, por estar localizada em latitude 23 Sul, que se configura com elevadas horas de sol no solstício de verão e menores no solstício de inverno.

Gráfico 6.2: Irradiação mensal de 2020 em Picinguaba (kWh/m<sup>2</sup>).

Fonte: Autor, 2021.

Além disso, apesar dos impactos dos obstáculos físicos e da posição do sol, observou-se de um modo geral uma relação direta entre o tamanho da área do telhado e a irradiação de energia ali contida (Gráfico 6.3), e com isso, o baixo desempenho de irradiação de algum telhado pode ser compensado com um aumento no número de módulos PV instalados.

Gráfico 6.3: Correlação entre tamanho da área do telhado em m<sup>2</sup> (X) e kWh produzidos no ano de 2020 (Y).



Fonte: Autor, 2021.

### 6.2.1 Valoração energética das edificações

Picinguaba possui 25.364 m<sup>2</sup> de telhados aptos para implantação de módulos fotovoltaicos. Um módulo fotovoltaico de silício monocristalino da marca Sunergy, modelo SUN-72M<sup>7</sup>, por exemplo, possui as dimensões 1,95m x 0,99m, e produz 360Wp, ou seja, sua capacidade plena de geração nos 1,93m<sup>2</sup> é de 0,19kW/m<sup>2</sup>. Caso fosse implantado em todos os telhados de Picinguaba, poderia desenvolver até 4.729,8 kWp. Obviamente seria impossível converter toda irradiação oriunda do sol em energia elétrica devido à limitação dos módulos fotovoltaicos, que segundo Imteaz & Ahsan (2018), chegam a entregar uma eficiência real muito inferior (7%) à informada pelos fabricantes que fornecem dados de ensaios laboratoriais (20%).

Conforme o Anuário de Energéticos por Municípios do Estado de São Paulo (2020), no ano de 2019, as residências de Ubatuba consumiram 134.893.928 kWh,

<sup>7</sup>Especificação do módulo SUN-72M: <http://downloads.sunergyworks.com/download/SUN%2072M.pdf>

ou 11.241.160,67 kWh mensais. O Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) estimou que em 2020 a população municipal totalizara 91.824 habitantes, com isso, chega-se ao consumo mensal de energia *per capita* de 122,42 kWh. Segundo o IBGE, na Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua (PNAD), realizada no ano de 2019, o número médio de brasileiros residentes por domicílio foi 2,9. Suponha-se que os 262 imóveis identificados fossem residências, Picinguaba teria uma população estimada 760 indivíduos, dessa forma, o consumo mensal estimado seria de 93.015,27 kWh.

Uma vez que cada edificação mapeada possui uma taxa de irradiação acumulada diferente, não seria válido normalizar os cálculos para identificar a produção global de energia a partir do potencial instalado em toda vila. Isso ocorre devido ao fato de uma das variáveis mais importantes, o HSP, ter profunda relevância na equação  $\text{Potência pico kWp} * \text{HSP} = \text{Energia gerada em kWh}$ . Para melhor exemplificar este fenômeno, serão utilizados dois extremos de irradiação média acumulada em edificações no ano de 2020 (Figura 5.15), o ID 243, com 526,67kWh/m<sup>2</sup> e o ID 88, com 1560.63kWh/m<sup>2</sup>. No primeiro caso, utilizando o módulo SUN-72M e desprezando todas as perdas do sistema, o ID 243 com HSP de 1,44h seria capaz de gerar 15,58 kWh por painel em um mês e demandaria 23 unidades, ou 45m<sup>2</sup> de telhado para atender três residentes. Já no ID 88, com HSP de 4,27, cada módulo seria capaz de gerar 46,15kWh, necessitando de 7 painéis e somente 13,6m<sup>2</sup> para efetivar a conversão para a edificação com três residentes. Naturalmente, um efetivo dimensionamento ultrapassa a complexidade de avaliações das médias de irradiação, uma vez que os sistemas possuem perdas de rendimento relacionadas aos materiais, temperatura ambiente e poeira, além dos fenômenos astronômicos observados nas latitudes mais distantes da linha do equador. Todavia esta simulação é capaz de estimar o potencial local para melhorar as discussões e incentivos sobre a conversão.

Conforme a média da área dos telhados de 92m<sup>2</sup>, seria viável a aplicação dos sistemas em praticamente todas as edificações mapeadas, que juntas, poderiam resultar na redução de até 502,4 toneladas de CO<sub>2</sub> por ano na atmosfera, de acordo com os fatores de emissão calculados pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações do Brasil, ano base 2020 (MCTI, 2021). Em suma, todos os imóveis mapeados são capazes de autossuficiência na produção de energia fotovoltaica, no entanto em nenhum momento do estudo, a capacidade de suporte do peso dos arranjos fotovoltaicos nos telhados foi avaliada.

No que tange aos investimentos para tal conversão, o mercado brasileiro de energia fotovoltaica conta com uma gama expressiva de equipamentos e empresas prestadoras de serviços de instalação e manutenção, com tecnologias importadas ou nacionais, assim, os custos deste modal podem variar até 58%<sup>8</sup>. Todavia, se for utilizado como referência os valores apresentados pelo Portal Solar<sup>9</sup>, uma residência de Picinguaba necessitaria de investir no mínimo U\$ 3.995,18 para produzir mensalmente 372,6kWh, com estimativa de vida útil do sistema para 20 anos ou mais. Conforme simulação na página oficial da concessionária de energia elétrica que atende o município<sup>10</sup>, no mês de fevereiro de 2020, o usuário pagaria U\$ 45,32 pelo consumo na bandeira tarifária mínima e U\$ 49,28 na máxima pelo consumo mensal estimado. Com isso, é possível também aferir em quanto tempo tal conversão poderia gerar o retorno do investimento aplicado.

### 6.3 Benefícios e limitações

Um dos principais benefícios do emprego da técnica, é que a partir dela é possível obter dados mais precisos de irradiação anual e HSP, que modelam o dimensionamento do sistema fotovoltaico. Estes dados são comumente fornecidos nos diversos atlas solarimétricos em escala regional, que em sua grande maioria, não consideram os efeitos dos obstáculos do MDS que a irradiância encontraria até alcançar a superfície investigada.

Outro item que é válido ressaltar, é que apesar de desprezar todas as perdas que envolveriam complexas operações relacionadas a cada um dos elementos que interferem no desempenho de um sistema fotovoltaico, o quantitativo de Picinguaba apresentado neste estudo poderá trazer à tona possíveis ganhos ambientais significativos na redução de emissão de carbono e desenvolvimento econômico local a partir da contratação de serviços especializados. Segundo Grimoni (2019) para cada

---

<sup>8</sup> Pesquisa publicada em agosto de 2020 no blog da empresa Ecoa Energia Renováveis: <https://www.ecoaenergias.com.br/2020/08/31/preco-sistema-fotovoltaico-placa-solar/#:~:text=Em%20geral%2C%20quanto%20maior%20o,rela%C3%A7%C3%A3o%20inversamente%20proporcional%20aos%20m%C3%B3dulos.>

<sup>9</sup> Custo de implantação médio de energia fotovoltaica. <https://www.portalsolar.com.br/painel-solar-precos-custos-de-instalacao.html>

<sup>10</sup> Simulador de conta de luz Elektro: <https://simulador.elektro.com.br/index/simulacao>

MW instalado, são gerados de 25 a 30 empregos diretos. O autor também destaca que no ano de 2016, foram criados 9,8 milhões de postos de trabalho na área de energia renovável em todo o mundo, deles, 3 milhões relacionados à energia fotovoltaica.

Discutir sobre esta conversão faz-se necessário, principalmente por existir modelos de sucesso já implementados ao redor do mundo. A inspiração para tal proposta foi concebida a partir da cidade sustentável desenvolvida pela empresa Panasonic, em parceria com o setor público, que colocou em prática a utilização de fontes renováveis para geração de energia em todos os imóveis de Fujisawa<sup>11</sup> (Figura 6.6). Sua inauguração ocorreu no ano de 2014 e consistiu em 1000 casas convertidas para produzirem energia fotovoltaica. Conforme a tabela 1.2, o Japão é o país com a melhor taxa de aproveitamento de produção de energia fotovoltaica por km<sup>2</sup> no mundo e, segundo Castro e Dantas (2018), tem buscado converter suas fontes de energia elétrica para modais mais limpos e seguros. Apesar do Brasil ter uma matriz segura e em sua grande maioria hidroelétrica, é sempre válido buscar melhorias e independência de fontes não renováveis.

---

<sup>11</sup> Projeto Fujisawa: <http://fujisawasst.com/EN/>

Figura 6.6: Imagem aérea de Fujisawa.



Fonte: Google Earth, 2021.

Ainda que caibam excelentes referências para estimular o uso de tal tecnologia, ressaltam-se algumas restrições técnicas, principalmente no que corresponde à dependência da luz solar para realização de trabalho. Nos horários noturnos, faz-se necessário o uso de outras fontes para alimentar o consumo energético de um cliente. Para contornar este problema existem duas soluções, a primeira seria desenvolver em conjunto com o sistema fotovoltaico fontes *off-grid* alimentadas por baterias que supririam suas demandas na ausência de irradiação solar, no entanto, segundo Boso *et al.* (2015), isso aumentaria em 59% o custo do projeto. A segunda, e mais usual, é a implantação do sistema *on-grid*, em que a rede já implantada pela concessionária supre o consumo do cliente nos horários em que não há incidência de luz, e com isso, cobra-se uma taxa pelo uso da estrutura, e de acordo com a Resolução Normativa 482, de abril de 2012, caso haja excedente produzido, este montante poderá ser computado como crédito com validade de 36 meses para utilização.

Além disso, apesar da minuciosa exposição dos métodos e resultados obtidos, uma das principais limitações deste trabalho é o fato de a proposta ter se baseado em modelagens, que segundo Christofletti (1999), apesar de possuírem princípios para simplificar a complexidade de algumas inter-relações dos sistemas a partir de uma

estrutura lógica, não são fidedignas à realidade. De toda forma, estes modelos permitem respostas para eventos e subsidiam simulações para tomadas de decisão que poderão ser benígnas para a sociedade. Um fator a ser levado em consideração é que toda a metodologia discutida neste trabalho demanda de equipamentos e mão de obra qualificada e especializada para o eficaz tratamento, manipulação e interpretação dos dados, portanto, poderá ser um limitador para ampla replicabilidade das simulações aqui concebidas.

## **CAPÍTULO 7. CONSIDERAÇÕES**

Apesar da contribuição técnica de mapeamento dos telhados subsidiada pelo SfM apresentar erros na grandeza de centímetros, recomenda-se o uso da metodologia aqui apresentada para captura de dados tridimensionais para a modelagem de usinas micro geradoras de energia fotovoltaica individual. O baixo custo na aquisição destes dados, associado à boa acurácia e celeridade de obtenção dos resultados nas plataformas computacionais demonstrados são capazes de consagrarem a técnica trabalhada.

Também é válido utilizar aplicações como a descrita neste estudo para balizar políticas públicas de estímulo à instalação de sistemas fotovoltaicos, uma vez que, a partir dele, passa-se a conhecer as estimativas de capacidade de geração de energia de um recorte espacial determinado. Afinal, esta tecnologia está a serviço da sociedade e, como discutido, novos postos de trabalho poderão ser criados. Cabe à iniciativa pública e privada prover acesso fácil ao crédito para uma democratização efetiva desta conversão. Ressalta-se que a implantação dos sistemas microgeradores exigem investimentos iniciais que podem ser diluídos ao longo do tempo – *payback* – e o estudo obteve uma relevância necessária ao identificar quais áreas são efetivamente favoráveis para que ocorra uma eficaz compensação financeira do projeto.

A peculiar característica de Picinguaba estar introduzida numa unidade de conservação, com restritivas regras de uso e ocupação do solo, não a limita em apresentar soluções sustentáveis de geração de energia alternativa. Com isso, evita-se o comprometimento de intervenção nas áreas verdes destinadas para a manutenção do bioma mata atlântica. Vale ressaltar que este estudo pode ser

replicado em qualquer parte do território nacional, no entanto, em grandes extensões de áreas urbanas a metodologia fica comprometida em função da baixa autonomia de voo dos sensores aqui empregados, cabendo ao *Lidar* embarcado em aeronaves pilotadas o papel de solução alternativa.

Percebe-se também que o desempenho da modelagem subsidiada por geotecnologias permanece inerente às propostas de planejamento territorial e compreensão e relacionamento das dinâmicas espaciais que ocorrem nos diversos níveis de escala. Cabe aos gestores públicos municipais fomentarem decisões de incentivo ao seu uso e buscarem parcerias para implementação, uma vez que a discussão da temática das cidades inteligentes está em voga.

Por fim, o estudo também poderá instigar diferentes metodologias de coleta com o SfM, como capturas oblíquas ou fotografias terrestres complementares na tentativa de melhoria da qualidade das esculturas tridimensionais digitais do algoritmo, que surgiu a partir de inspirações no campo da psicologia, consolidou-se na computação e foi incorporado às geociências. Cabe também enaltecer sua popularidade observada na última década e esperar que novas soluções tecnológicas do SfM possam contribuir para a melhoria de vida da sociedade.

## REFERÊNCIAS DOS CAPÍTULOS 5, 6 E 7.

ANDRADE J. B. – **Fotogrametria**. Curitiba, SBEE, 2ª edição 274p. 2003.

ARCGIS USER GUIDE - <<https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/modeling-solar-radiation.htm>>

BOSO, A. C. M. R *et al.* - Análise de Custos dos Sistemas Fotovoltaicos On-Grid e Off-Grid no Brasil. **ANAP Brasil**. V.8 n.12, 2015. Disponível em: <<https://pdfs.semanticscholar.org/4ccc/75c3595bd05e3a16c19ce15f143e58aa4bb2.pdf>> Data de acesso: 28/02/2021.

CASTRO, N e DANTAS, G. – **Experiências Internacionais em Geração Distribuída: Motivações, Impactos e Ajustes**. Rio de Janeiro. Publit. 442p. 2018. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/profile/Guillermo-Ivan-Pereira-2/publication/327120758\\_Policies\\_for\\_distributed\\_solar\\_generation\\_in\\_Nevada/links/5b7b163392851c1e1223b3d0/Policies-for-distributed-solar-generation-in-Nevada.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Guillermo-Ivan-Pereira-2/publication/327120758_Policies_for_distributed_solar_generation_in_Nevada/links/5b7b163392851c1e1223b3d0/Policies-for-distributed-solar-generation-in-Nevada.pdf)> Data de acesso: 01/02/2021.

CHRISTOFOLETTI, A. - **Modelagem de Sistemas Ambientais**. São Paulo: Edgard Blücher, 257p. 1999.

GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO - **Anuário de Energéticos por Municípios do Estado de São Paulo. Ano base 2019.** Disponível em: [https://dadosenergeticos.energia.sp.gov.br/portalicev2/intranet/BiblioVirtual/diversos/anuario\\_energetico\\_municipio.pdf](https://dadosenergeticos.energia.sp.gov.br/portalicev2/intranet/BiblioVirtual/diversos/anuario_energetico_municipio.pdf) Data de acesso: 21/01/2021.

GRIMONI, J. - **Energia Solar Fotovoltaica.** Universidade de São Paulo. 2019. Disponível em: <http://paineira.usp.br/sisea/wp-content/uploads/2019/03/Energia-Solar-Fotovoltaica-pme3561.pdf> Data de acesso: 11/12/2020.

IMTEAZ, M. & AHSAN, A. - Solar panels: Real efficiencies, potential productions and payback periods for major Australian cities. **Sustainable Energy Technologies and Assessments.** V.25, p.119-125, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213138816301291>. Data de acesso: 04/03/2021.

JENSEN, J. R. – **Sensoriamento Remoto do Ambiente: Uma Perspectiva em Recursos Terrestres.** Tradução da Segunda Edição. São José dos Campos. Parêntese. 661p. 2009.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES - **Fatores de emissão da margem de operação pelo método da análise de despacho.** Disponível em: [https://antigo.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SEPED/clima/textogeral/emissao\\_despacho.html](https://antigo.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SEPED/clima/textogeral/emissao_despacho.html)

MINISTÉRIO DA DEFESA - **Norma Da Especificação Técnica Para Controle de Qualidade De Dados Geoespaciais (ET-CQDG).** 1 edição. 2016. Disponível em: [http://www.geoportal.eb.mil.br/portal/images/PDF/ET\\_CQDG\\_1a\\_edicao\\_2016.pdf](http://www.geoportal.eb.mil.br/portal/images/PDF/ET_CQDG_1a_edicao_2016.pdf) Data de acesso: 18/12/2020.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - **Resolução Normativa Nº 482, De 17 de Abril De 2012.** Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf> Data de acesso: 18/12/2020.

NOBREGA, B. S. *et al.*- Desempenho de um sistema solar fotovoltaico com diferentes inclinações e orientações azimutais em cidades da Paraíba. **Revista Principia.** (43)p.175. Disponível em: <https://periodicos.ifpb.edu.br/index.php/principia/article/view/1950> Data de acesso: 15/12/2020.

PINHO, J. T. & GALDINO. M. A. - **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos.** CEPEL. Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: [http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual\\_de\\_Engenharia\\_FV\\_2014.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf) Data de acesso: 25/03/2020.

## ANEXO

Memória de cálculo			
C1	Consumo eletricidade total em ubatuba (2019)	134.893.928,00	kWh
C2	Total de hab.ubatuba (IBGE, 2020)	91.824,00	unid
C3	Consumo anual por hab. em ubatuba = (C1/C2)	1.469,05	kWh
C4	Consumo mensal por hab. em ubatuba = (C3/12)	122,42	kWh
C5	Consumo diário por hab. em Ubatuba = (C4/30)	4,08	kWh
C6	Total de edificações mapeadas em Picinguaba	262,00	unid
C7	Media habitantes res (IBGE PNAD 2019)	2,90	unid
C8	População estimada picinguaba = (C7*C6)	759,80	unid
C9	Metragem de telhado sem sul	25.634,00	m <sup>2</sup>
C10	Módulo SUN-72 potência	0,36	kWp
C11	Módulo SUN-72 área	1,93	m <sup>2</sup>
C12	Quantidade de módulos para cobrir toda vila = (C9*C11)	13.281,87	unid
C13	Potência instalada = (C12*C10)	4.781,47	kW
C14	Edificação com irradiação acumulada de melhor desempenho (ano 2020)	1.580,63	kWh/m <sup>2</sup>
C15	Edificação com irradiação média mensal de melhor desempenho (mensal 2020) =(C14/12)	130,05	kWh/m <sup>2</sup>
C16	Edificação com irradiação média diária de melhor desempenho (diário 2020) =(C14/365)	4,28	kWh/m <sup>2</sup>
C17	Edificação com irradiação acumulada de pior desempenho (ano 2020)	526,67	kWh/m <sup>2</sup>
C18	Edificação com irradiação média mensal de pior desempenho (mensal 2020) =(C17/12)	17,56	kWh/m <sup>2</sup>
C19	Edificação com irradiação média diária de pior desempenho (diário 2020) =(C17/365)	1,44	kWh/m <sup>2</sup>
C20	Modulo fotovoltaico	0,36	kWp
C21	área do módulo	1,93	m <sup>2</sup>
C22	potencia por m <sup>2</sup> = (C21/C20)	0,19	kW/m <sup>2</sup>
C23	HSP da melhor edificação = C16	4,28	horas
C24	HSP da pior edificação = C19	1,44	horas
C25	produção de energia mensal melhor edificação por módulo = (C23*C10*30)	46,18	kWh
C26	produção de energia mensal pioredificação por módulo = (C24*C10*30)	15,58	kWh
C27	módulos necessários na melhor edificação para 3 pessoas = (C4*3/C25)	8	unidades
C28	módulos necessários na pior edificação para 3 pessoas = (C4*3/C26)	24	unidades
C29	MDL (Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações do Brasil)	0,45	Ton CO2
C30	Consumo anual picinguaba mega Watt =(C8*C4*12)	1.116.183,20	kWh
C31	Redução total de carbono na atm = (C30/C29)	502.282,44	Toneladas