

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

KARINA DE SOUZA SILVA

**METODOLOGIA PARA ANÁLISE PRELIMINAR DA DISPONIBILIDADE DE
ÁREAS PARA IMPLANTAÇÃO DE PAINÉIS SOLARES FOTOVOLTAICOS COM
DADOS LIDAR**

**Curitiba
2013**

KARINA DE SOUZA SILVA

**METODOLOGIA PARA ANÁLISE PRELIMINAR DA DISPONIBILIDADE DE
ÁREAS PARA IMPLANTAÇÃO DE PAINÉIS SOLARES FOTOVOLTAICOS COM
DADOS LIDAR**

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

Orientador: Professor Doutor Jorge Antonio Silva Centeno

**Curitiba
2013**

Silva, Karina de Souza

Metodologia para análise preliminar da disponibilidade de áreas para implantação de painéis solares fotovoltaicos com dados LIDAR / Karina de Souza Silva. – Curitiba, 2013.

104 f. : il.; tab.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas.

Orientador: Jorge Antonio Silva Centeno

1. Sistemas de energia fotovoltaica. I. Centeno, Jorge Antonio Silva. II. Título.

CDD 621.31244



Universidade Federal do Paraná
Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas
Caixa Postal 19001 - Fone: (41) 361-3153
CEP 81531-990 - Curitiba - PR - Brasil - e-mail: cpgcg@ufpr.br

PARECER

PARECER FINAL DA BANCA EXAMINADORA DA PROVA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DA PÓS-GRADUANDA **KARINA DE SOUZA SILVA**

Na defesa da Dissertação de Mestrado realizada no dia trinta de abril de dois mil e treze da candidata ao Título de Mestre em Ciências, **KARINA DE SOUZA SILVA**, intitulada "*METODOLOGIA PARA ANÁLISE PRELIMINAR DA DISPONIBILIDADE DE ÁREAS PARA IMPLANTAÇÃO DE PAINÉIS SOLARES FOTOVOLTAICOS COM DADOS LIDAR*" foi aprovada, tendo concedido o prazo regular de sessenta dias para a apresentação da redação final com as sugestões propostas pela Banca. Os signatários da presente, membros da Banca Examinadora, receberam um exemplar da Dissertação em sua versão definitiva, verificando cada um, após a leitura da mesma que as indicações da Banca Examinadora foram atendidas sendo de parecer que o candidato está em condições de receber o Título de Mestre em Ciências.

Curitiba,

Prof. Dr. Jorge Antonio Silva Centeno (UFPR) - Orientador e Presidente

Prof. Dr. Aloísio Leoni Schmid - Membro (UFPR)

Prof. Dr. Alzir Felipe Buffara Antunes - Membro (UFPR)

Aos meus pais, Celina e Claudeonísio.

Ao meu namorado, Maurício.

À minha irmã, Clarissa.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, que me inspirou e me deu forças para concluir este trabalho.

Aos meus pais, de uma maneira muito especial, por todo o apoio nos momentos difíceis, incentivo, dedicação e pelos exemplos de trabalho e de vida.

Ao meu namorado, pelo carinho, compreensão nos momentos de dificuldades e por fazer a minha vida mais feliz.

À minha irmã, pelo companheirismo.

Ao professor Jorge Antonio Silva Centeno, pelas orientações, indicação das primeiras leituras, conversas e incentivo no término deste trabalho.

Ao professor Hideo Araki, pelas conversas e colaborações.

À professora Claudia Pereira Krueger e ao pessoal do Laboratório de Geodésia Espacial e Hidrografia que me apoiaram e incentivaram à entrada no Mestrado.

Aos amigos, Andrea, Rafael, Camila e Renata, pela amizade, apoio, ajuda no trabalho e pelos momentos de descontração. E aos demais colegas que contribuíram de alguma forma com este trabalho.

À Mayssa Mascarenhas Grise Monteiro pelo fornecimento da imagem GeoEye.

À Universidade Federal do Paraná (UFPR), e em especial, aos funcionários do Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, pela oportunidade e ajuda sempre que preciso.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa de estudos fornecida durante vinte e quatro meses.

À Empresa Esteio – Engenharia e Aerolevantamentos S.A., por fornecer dados LIDAR aerotransportado e fotografias aéreas de alta resolução.

*Que os vossos esforços desafiem as
impossibilidades, lembrai-vos de que as
grandes coisas do homem foram
conquistadas do que parecia impossível.*

Charles Chaplin

RESUMO

A demanda mundial de energia tem aumentado continuamente. Um dos motivos é o crescimento da população e de suas necessidades, além do uso irracional, causando grande desperdício. Esse é um dos vários motivos pelos quais o ser humano enfrenta problemas de aspectos ambientais, como o aquecimento global e as chuvas ácidas. A partir dessas, e outras, consequências, as fontes renováveis de energia se popularizaram. A energia solar de potencial fotovoltaico é uma alternativa renovável que pode contribuir com a redução de impactos ambientais de edificações e promover comunidades mais sustentáveis. Neste trabalho, desenvolveu-se um método para calcular, de forma semiautomática, a disponibilidade para implantação de painéis solares fotovoltaicos em regiões urbanas utilizando dados LIDAR. Para isso, foram utilizados dados, como o potencial fotovoltaico, radiação solar, área, inclinação e orientação dos telhados das edificações.

Palavras-chave: Potencial fotovoltaico. Energia. LIDAR.

ABSTRACT

The world energy demand is increasing continuously. One reason is the growth of population and its needs, and the irrational use, causing great waste. This is one of several reasons why mankind faces environmental problems such as global warming and acid rain. From these and other reasons, renewable sources of energy have become popular. The photovoltaic conversion is a renewable alternative that can contribute to reducing environmental impacts of buildings and promote more sustainable communities. In this work, we developed a method to calculate semiautomatically the availability for deployment of photovoltaic solar panels in urban areas using LIDAR data. For this, we used data such as potential photovoltaic, solar radiation, area, orientation and inclination of the roofs of buildings.

Keywords: Photovoltaic potential. Energy. LIDAR.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - SEÇÃO DE CÉLULA SOLAR.....	24
FIGURA 2 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO EM UMA RESIDÊNCIA CONECTADO À REDE ELÉTRICA	26
FIGURA 3 - ÓRBITA DA TERRA EM TORNO DO SOL: POSIÇÃO DA TERRA COM RELAÇÃO AO SOL NOS SOLSTÍCIOS E EQUINÓCIOS.....	30
FIGURA 4 - A TERRA E O SOL NAS POSIÇÕES DOS SOLSTÍCIOS E DOS EQUINÓCIOS	31
FIGURA 5 - SOLSTÍCIO DE JUNHO – INCIDÊNCIA DE SOL AO MEIO-DIA.....	31
FIGURA 6 - EQUINÓCIOS DE MARÇO E DE SETEMBRO	31
FIGURA 7 - SOLSTÍCIO DE DEZEMBRO – INCIDÊNCIA DE SOL AO MEIO-DIA.....	32
FIGURA 8 - RELAÇÕES GEOMÉTRICAS ENTRE O SOL E A TERRA.....	32
FIGURA 9 - ÂNGULOS HORÁRIOS COMPREENDIDOS DENTRO DO INTERVALO DE UM DIA ...	34
FIGURA 10 - MOVIMENTO APARENTE DO SOL E TEMPO DE INSOLAÇÃO PARA DUAS LOCALIDADES.....	35
FIGURA 11 - MAPA DA IRRADIAÇÃO SOLAR MÉDIA NO BRASIL.....	36
FIGURA 12 - MAPA DA VARIABILIDADE DIÁRIA DA IRRADIAÇÃO SOLAR	36
FIGURA 13 - DISTRIBUIÇÃO DA MÉDIA DE IRRADIAÇÃO GLOBAL POR REGIÕES DO PAÍS	37
FIGURA 14 - SISTEMA DE MEDIÇÃO INERCIAL	39
FIGURA 15 - PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DE UM SISTEMA LASER AEROTRANSPORTADO.....	40
FIGURA 16 - RETORNOS	42
FIGURA 17 - TIPOS DE ESPELHOS DE VARREDURA LASER.....	43
FIGURA 18 - PADRÕES DE VARREDURA LASER EM FUNÇÃO DO ESPELHO DO SENSOR	43
FIGURA 19 - DIFERENÇA ENTRE O MDS (EM VERMELHO) E MDT (EM AZUL)	45
FIGURA 20 – LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO 1	48
FIGURA 21 – ÁREA DE ESTUDO 1	49
FIGURA 22 – LOCALIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO 2 E 3	50
FIGURA 23 – ÁREA COBERTA PELA ORTOFOTO.....	51
FIGURA 24 – ESTAÇÃO TOTAL LEICA TC407.....	53
FIGURA 25 - ETAPAS DA METODOLOGIA	55
FIGURA 26 – EXEMPLO DE DEFICIÊNCIA CONVEXA. A) SEGMENTO ORIGINAL. B) SEGMENTO COM O FECHO CONVEXO EM LINHA VERMELHA.....	61
FIGURA 27 - EXEMPLO DE AUTOVETORES DE UMA NUVEM DE PONTOS	62
FIGURA 28 – COORDENADAS DOS CANTOS DAS EDIFICAÇÕES.....	64
FIGURA 29 – CUMEEIRA DO TELHADO	64
FIGURA 30 – ORIENTAÇÃO DAS ÁGUAS DOS TELHADOS	65
FIGURA 31 – DEFINIÇÃO DE ÁREA	66
FIGURA 32 – ÁREA DE ESTUDO 1.....	70

FIGURA 33 – ÁREA DE ESTUDO 2	71
FIGURA 34 – ÁREA DE ESTUDO 3	71
FIGURA 35 – MDT DA ÁREA 1	72
FIGURA 36 – MDT DA ÁREA 2	72
FIGURA 37 – MDT DA ÁREA 3	73
FIGURA 38 – MDS DA ÁREA 1	74
FIGURA 39 – MDS DA ÁREA 2	74
FIGURA 40 – MDS DA ÁREA 3	75
FIGURA 41 – MDSN DA ÁREA 1	75
FIGURA 42 – MDSN DA ÁREA 2	76
FIGURA 43 – MDSN DA ÁREA 3	76
FIGURA 44 – IMAGEM SEGMENTADA DA ÁREA 1	77
FIGURA 45 – IMAGEM SEGMENTADA DA ÁREA 2	78
FIGURA 46 – IMAGEM SEGMENTADA DA ÁREA 3	78
FIGURA 47 - SEGMENTAÇÃO DA ÁREA 1	79
FIGURA 48 - SEGMENTAÇÃO DA ÁREA 2	79
FIGURA 49 - SEGMENTAÇÃO DA ÁREA 3	80
FIGURA 50 - IMAGEM DE OBJETOS ELEVADOS APÓS A SUAUIZAÇÃO PELO OPERADOR DE MORFOLOGIA MATEMÁTICA DE ABERTURA PARA A ÁREA 1	80
FIGURA 51 - IMAGEM DE OBJETOS ELEVADOS APÓS A SUAUIZAÇÃO PELO OPERADOR DE MORFOLOGIA MATEMÁTICA DE ABERTURA PARA A ÁREA 2	81
FIGURA 52 - IMAGEM DE OBJETOS ELEVADOS APÓS A SUAUIZAÇÃO PELO OPERADOR DE MORFOLOGIA MATEMÁTICA DE ABERTURA PARA A ÁREA 3	81
FIGURA 53 - GRADE DE TEXTURA PARA A ÁREA DE TESTE 2	82
FIGURA 54 - SEGMENTAÇÃO DE ÁREAS COM POUCA VARIAÇÃO SUPERFICIAL OU BAIXA TEXTURA – ÁREA 1	83
FIGURA 55 - SEGMENTAÇÃO DE ÁREAS COM POUCA VARIAÇÃO SUPERFICIAL OU BAIXA TEXTURA – ÁREA 2	83
FIGURA 56 - SEGMENTAÇÃO DE ÁREAS COM POUCA VARIAÇÃO SUPERFICIAL OU BAIXA TEXTURA – ÁREA 3	84
FIGURA 57 - PRÉDIOS SEGMENTADOS NA ÁREA 1	84
FIGURA 58 - PRÉDIOS SEGMENTADOS NA ÁREA 2	85
FIGURA 59 - PRÉDIOS SEGMENTADOS NA ÁREA 3	85
FIGURA 60 - PRÉDIOS SELECIONADOS NA ÁREA 1	86
FIGURA 61 - PRÉDIOS SELECIONADOS NA ÁREA 2	87
FIGURA 62 - PRÉDIOS SELECIONADOS NA ÁREA 3	87
FIGURA 63 – PRÉDIOS CALCULADOS COM MÉTODO TOPOGRÁFICO	88
FIGURA 64 – REPRESENTAÇÃO DO MDSN (A) E DA SEGMENTAÇÃO (B) NA EDIFICAÇÃO 61 .	92
FIGURA 65 – EXEMPLO DE ERRO DE COTA	92
FIGURA 66 – ÁREAS GEMINADAS	93

FIGURA 67 - ANÁLISE DA FREQUENCIA DO ERRO PARA AS ÁREAS TESTE 02 E 03..... 96

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – CARACTERÍSTICAS DAS TECNOLOGIAS DE ALGUNS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS DISPONÍVEIS NO MERCADO	28
TABELA 2 – RESULTADOS TOPOGRÁFICO, MANUAL E DIFERENÇAS.....	89
TABELA 3 – QUANTIDADE DE ENERGIA GERADA PELO SISTEMA COM OS DADOS DA ESTAÇÃO TOTAL E MANUAL	89
TABELA 4 – VALORES DE ÁREA, INCLINAÇÃO, ORIENTAÇÃO E SUAS DIFERENÇAS PARA A ÁREA 1	90
TABELA 5 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DO POTENCIAL FOTOVOLTAICO NA ÁREA 1	90
TABELA 6 – VALORES DE ÁREA, INCLINAÇÃO, ORIENTAÇÃO E SUAS DIFERENÇAS PARA A ÁREA 2	91
TABELA 7 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DO POTENCIAL FOTOVOLTAICO NA ÁREA 2	94
TABELA 8 – VALORES DE ÁREA, INCLINAÇÃO, ORIENTAÇÃO E SUAS DIFERENÇAS PARA A ÁREA 3	95
TABELA 9 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DO POTENCIAL FOTOVOLTAICO NA ÁREA 3	96

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ALS	-	ingl. <i>Airborne LASER Scanner</i>
ANEEL	-	Agência Nacional de Energia Elétrica
a-Si	-	Silício Amorfo Hidrogenado
CA	-	Corrente Alternada
CC	-	Corrente Contínua
CdTe	-	Telureto de Cádmio
CIS	-	Disseleneto de Cobre e Índio
CNPq	-	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CO ₂	-	Dióxido de carbono
c-Si	-	Silício Cristalino
E	-	Latitude
Ed.	-	Editora
<i>Et al.</i>	-	<i>Et alli.</i>
GPS	-	ingl. <i>Global Positioning System</i>
h	-	Altitude
IMU	-	ingl. <i>Inertial Measurement Unit</i>
Ingl.	-	Inglês
kW	-	Quilowatt
kWh	-	Quilowatt hora
kWp	-	Quilowatt pico
LASER	-	ingl. <i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i>
LIDAR	-	ingl. <i>Light Detection And Ranging</i>
MDS	-	Modelo Digital de Superfície
MDSn	-	Modelo Digital de Superfície Normalizado
MDT	-	Modelo Digital do Terreno
m-Si	-	Silício Monocristalino
MW	-	Megawatt
MWh	-	Megawatt hora
MWp	-	Megawatt pico
N	-	Longitude

- p. - página
- p-Si - Silício Policristalino
- SFCR - Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede
- UFPR - Universidade Federal do Paraná

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	16
1.2 JUSTIFICATIVA.....	17
1.3 OBJETIVOS	18
1.3.1 Objetivo geral.....	18
1.3.2 Objetivos específicos.....	18
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	19
2 REVISÃO DE LITERATURA	20
2.1 ENERGIA SOLAR	22
2.1.1 Início do aproveitamento da energia solar	23
2.1.2 Efeito fotovoltaico	23
2.1.4 Movimento solar e direcionamento dos painéis fotovoltaicos	28
2.2 IRRADIAÇÃO SOLAR NO BRASIL.....	35
2.3 AIRBORNE LASER SCANNER - ALS	37
2.3.1 O sistema ALS	37
2.3.2 Componentes	38
2.3.3 Princípio de funcionamento	39
2.3.4 Características.....	41
2.3.5 Imagem Intensidade	44
2.4 MODELOS DIGITAIS.....	44
2.5 SEGMENTAÇÃO DE IMAGENS.....	45
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	47
3.1 ÁREAS DE ESTUDO.....	47
3.2 MATERIAIS	51
3.2.1 Fotografia Aérea	52
3.2.2 Imagem de satélite	52
3.2.3 Dados do Lidar	52
3.2.4 Equipamento Topográfico	52
3.2.5 Programas Computacionais	53
3.3 METODOLOGIA.....	54
3.3.1 Geração do MDT, MDS e imagem de intensidade.....	56
3.3.2 Geração do MDSn.....	57
3.3.3 Recorte	58
3.3.4 Segmentação dos telhados e detecção de bordas	58

3.3.5	Análise de segmentos para extrair a vegetação e objetos pequenos.....	59
3.3.6	Cálculo de área, inclinação e orientação de telhados.....	60
3.3.7	Áreas viáveis	66
3.3.8	Teste e validação.....	69
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	70
4.1	RESULTADOS.....	70
4.1.1	MDT, MDS e MDSn.....	72
4.1.2	Segmentação.....	77
4.2	DISCUSSÕES	88
4.2.1	Área de estudo 1	88
4.2.2	Área de estudo 2	91
4.2.3	Área de estudo 3	94
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	97
5.1	CONCLUSÕES.....	97
5.2	RECOMENDAÇÕES	98
	REFERÊNCIAS.....	99
	OBRAS CONSULTADAS.....	104

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

As fontes renováveis de energia ganharam expressão a partir do reconhecimento internacional das consequências do aumento do efeito estufa sobre o meio ambiente, causado pela queima dos combustíveis fósseis e das florestas tropicais.

A energia solar com potencial fotovoltaico é um método promissor de produção de energia elétrica que visa a sustentabilidade, trazendo benefícios ambientais e energéticos, e sua eletricidade produzida em cada metro quadrado pode evitar, efetivamente, emissões de mais de duas toneladas de CO₂ na atmosfera ao longo de sua vida útil. Poucas pessoas hoje acreditam que as emissões de CO₂ na atmosfera possam continuar a crescer sem consequências funestas, como o aquecimento global. O amplo uso de energia fotovoltaica em edificações pode ajudar a reduzir tais impactos ambientais das edificações, as quais são responsáveis por gerar mais de 50% de todas as emissões globais dos gases estufa (CEPEL, 2004).

Segundo Scheer (2002), para que esse tipo de energia seja viável, três dados são fundamentais. Em primeiro lugar, as necessidades energéticas de certa região e sua relação com a economia nacional; em segundo lugar, a capacidade de rendimento de cada uma das tecnologias solares, a superfície e o espaço que requerem e a radiação solar; e, em terceiro e último lugar, os custos de implantação das técnicas transformadoras distintas.

A eficiência no uso da energia, em especial a elétrica, está em foco desde os choques do petróleo na década de 70, quando ficou patente que as reservas fósseis não seriam baratas para sempre, nem o seu uso seria sem prejuízos para o meio ambiente. Então, descobriu-se que o mesmo serviço de energia (iluminação, força motriz e os usos que proporciona, aquecimento, condicionamento ambiental, equipamentos eletro-eletrônicos, etc.) poderia ser proporcionado com menos gasto de energia, com repercussões econômicas, ambientais, sociais e culturais (Plano Nacional de Energia 2030).

Com base na média de irradiação solar no Brasil, pode-se afirmar que existe um predomínio de dias ensolarados, fazendo com que uma maior quantidade de energia seja absorvida, sob a forma de radiação direta. Outro fator importante é que, em algumas regiões do Brasil, a densidade populacional é menor com relação aos locais industrializados e o espaço físico para aplicação do sistema é maior.

Para a análise da viabilidade do uso de energia solar em áreas urbanas é necessário ter o conhecimento da geometria das superfícies potenciais para a instalação de placas de células fotovoltaicas. Dentro deste contexto, as ferramentas de sensoriamento remoto, especialmente o *LIDAR*, oferecem a possibilidade de facilitar a análise dos telhados de edificações de uma grande área. Este trabalho visa verificar a viabilidade do uso de dados provenientes de sistemas *LIDAR* aerotransportados para estudos de implantação de painéis solares com potenciais fotovoltaicos.

De acordo com Voegtle (2005), esta técnica permite avaliar o potencial fotovoltaico de várias residências com uma única pesquisa. Conhecer o potencial fotovoltaico de uma residência, bem como o seu posicionamento correto, é fator decisivo para o uso deste tipo de energia.

1.2 JUSTIFICATIVA

A necessidade de aumento da capacidade brasileira de geração energética é uma questão atual. Tendo em vista que não há mais a mesma disponibilidade de recursos para financiar grandes obras civis, o crescente aumento da importância do meio ambiente e os problemas com relação à oferta e a demanda energética no país, Salamoni (2004) defende a necessidade de buscar novas fontes de energia.

O sistema solar de potencial fotovoltaico, além de ser mais sustentável e causar menor dano ao meio ambiente, funciona em pequena escala e pode ser instalado próximo ao ponto de consumo, evitando perdas na distribuição quando a geração é centralizada.

Em períodos de calor intenso, quando ocorre maior incidência solar, a geração de energia solar fotovoltaica atinge valores máximos, coincidindo com os

picos de consumo em edificações comerciais que possuam instalações solares com potencial fotovoltaico.

Este trabalho visa à contribuição com o mapeamento de áreas potencialmente aproveitáveis para geração de energia elétrica solar de teor fotovoltaico em regiões urbanas, tendo em vista que a irradiação emitida pelo Sol é uma fonte inesgotável de energia e responsável pelo equilíbrio da vida na Terra, e por causa desse potencial é que se pode transformar, por meio de sistemas de captação e conversão, a energia solar em térmica ou elétrica.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo geral dessa pesquisa é avaliar a viabilidade do uso de dados provenientes de varredura com LIDAR aerotransportado na detecção de locais apropriados à instalação de painéis fotovoltaicos, e estimar o potencial de geração de energia solar fotovoltaica em áreas urbanas através da segmentação de dados provenientes de LIDAR para extração de telhados e cálculos da área, orientação e inclinação.

1.3.2 Objetivos específicos

Em função do objetivo geral, tem-se como objetivos específicos:

- Extrair os contornos dos telhados utilizando dados LIDAR;
- Definir a área, orientação e inclinação dos telhados;
- Calcular o índice de insolação para a área de estudo;
- Analisar o potencial de geração de energia;
- Avaliar o resultado da estimativa da viabilidade da implantação de painéis solares por LIDAR .

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação está subdividida em cinco capítulos. No primeiro, são apresentadas algumas considerações iniciais, a justificativa e os objetivos. No seguinte são revisados alguns conceitos fundamentais relacionados à energia solar fotovoltaica e à principal fonte de dados utilizada neste trabalho – o sistema de varredura a LASER aerotransportado, conhecido também como LIDAR. Os materiais e equipamentos utilizados e a metodologia aplicada estão descritos no terceiro capítulo. No seguinte, são mostrados os resultados obtidos e suas discussões. As conclusões e recomendações são apresentadas no quinto capítulo.

2 REVISÃO DE LITERATURA

O crescimento do consumo de energia elétrica no Brasil, conforme comentam Martins *et al.* (2007), vem apresentando rápida evolução, implicando em taxas anuais de expansão significativamente superiores ao crescimento da economia e da própria demanda energética.

Salamoni (2004) diz que a geração de energia elétrica convencional é centralizada e distante do ponto de consumo, isso faz com que o sistema tenha perdas na transmissão e distribuição, aumentando os custos da produção da energia e causando danos às concessionárias e ao meio ambiente. Por outro lado, relata Rodrigues (2002) que a geração de energia com potencial fotovoltaico é vantajosa ao setor elétrico, uma vez que permite uma maior diversificação das tecnologias empregadas para a produção de energia, de forma a buscar a sustentabilidade. Devido a fatores como este, aumentar a eficiência energética é uma estratégia para solucionar alguns problemas enfrentados pelas concessionárias, pois a eficiência do uso final reduz a taxa de crescimento da demanda de eletricidade, sem diminuir os bens e serviços fornecidos (SALAMONI, 2004).

Uma forma rápida e precisa de se calcular o potencial de energia fotovoltaico, é com a utilização de dados provenientes do sistema LIDAR aerotransportado. Santos *et al.* (2011) descrevem que, com o advento desta tecnologia, o tempo e a facilidade na forma de obtenção de informações da superfície terrestre foram praticamente superados. Estudos de rotinas para a definição automática, com precisão e eficiência, das bordas de objetos planos (como os contornos das edificações) estão em pleno desenvolvimento.

Mayer (1999) e Shufelt (1999) pesquisaram sobre o estado da arte das técnicas de extração automática de edificações e concluíram que um sistema totalmente automático ainda está longe de ser desenvolvido. Por outro lado, as abordagens semiautomáticas vêm se tornando cada vez mais importantes (SAHAR & KRUPNIK, 1999).

Uma grande vantagem do uso de dados derivados da varredura com sistema LIDAR é a disponibilidade de um grande número de pontos tridimensionais na superfície do telhado de edificações. No entanto, devido ao processo de varredura,

não há garantias de que ocorram pontos exatamente nos limites do telhado (HAALA & BRENNER, 1999). Apesar dos problemas mencionados, o estudo de Botelho (2007) aponta que a segmentação dos dados do sistema LIDAR é um método que identifica automaticamente os objetos na cena, otimizando todo o processo.

Voegtler *et al.* (2005) usaram uma abordagem com dois diferentes conjuntos de dados essenciais, dados LIDAR para a derivação das estruturas de telhado e a construção de bordas de polígonos para extrair construções individuais através de um modelo de superfície obtido por triangulação a partir do mesmo conjunto de dados LIDAR. Segundo ele, o último conjunto de dados é necessário, embora existam uma série de métodos para detecção e modelagem 3D de edifícios a partir de dados laserscanning. Para a exclusão da maioria dos erros grosseiros Voegtler *et al.* (2005) fizeram uma inspeção visual das nuvens de pontos e um procedimento de edição manual de desvios evidentes.

Kassner *et al.*, usam dados LIDAR para representarem os telhados dos edifícios, que são analisados de acordo com o declive, a exposição azimutal e as áreas sombreadas. A avaliação da qualidade das áreas dos telhados é realizada por meio de um conjunto de dados 3D, que são semi-automaticamente adquiridos por fotografias aéreas. Eles, ainda, mostram que a classificação de acordo com a exposição de diferentes trechos de telhado podem conduzir a bons resultados, mesmo para as superestruturas mais complexas, desde que os dados LIDAR tenham uma densidade de pontos suficiente.

O uso de LIDAR para o cálculo de áreas potencialmente aproveitáveis, segundo Hippenstiel & Brownson (2011), tem boas vantagens sobre outros dados de sensoriamento remoto. Uma das mais interessantes é a capacidade de capturar dados durante a noite, ajudando a aumentar a disponibilidade de janelas de voo. Uma outra vantagem é que ajuda a definir o processamento de dados, é a capacidade do LIDAR para recolher dados. Dependendo da densidade da vegetação, os pulsos do laser podem viajar através de buracos entre as folhas, galhos ou árvores individuais. Portanto, pulsos de laser podem atingir vários níveis sendo registrado como primeiro, segundo, terceiro retornos. Estes retornos são uma parte valiosa de informação no que se refere ao processamento de dados. O nível de retorno do pulso é muito informativo sobre as superfícies proporcionando um

impressionante aumento dos dados, além de coletar a intensidade dos pulsos. Essas qualidades contribuem para o processamento automatizado.

Nas subseções deste capítulo, serão apresentados conteúdos diretamente relacionados com o trabalho desenvolvido.

2.1 ENERGIA SOLAR

A energia solar é aproveitada tanto como fonte de calor como de luz, sendo inesgotável, representando, por esta razão, uma das alternativas energéticas mais promissoras. Entre os vários processos de aproveitamento da energia solar, os mais usados atualmente são o aquecimento de água e a geração fotovoltaica de energia elétrica. (fonte: Aneel, 2005)

O uso da energia solar é uma solução atrativa tanto em regiões mais isoladas, não abastecidas por energia elétrica, como em regiões eletrificadas, especialmente no Brasil onde há bons índices de insolação em todo o território.

Anualmente, o Sol irradia sobre a Terra o equivalente a dez mil vezes a energia consumida pela população mundial neste mesmo período. E, de acordo com a empresa Energias de Portugal (EDP, 2012), ele produz, continuamente, cerca de 390 sextilhões de quilowatts de potência.

De acordo com a ANEEL (2005), a radiação solar pode ser utilizada diretamente como fonte de energia térmica, para aquecimento de fluidos e ambientes e para geração de potência mecânica ou elétrica. Pode ainda ser convertida diretamente em energia elétrica, por meio de efeitos sobre determinados materiais. A conversão direta da energia solar em energia elétrica ocorre pelos efeitos da radiação (calor e luz) sobre determinados materiais, particularmente os semicondutores.

Segundo Dadalto (2008), a eletricidade se tornou essencial no uso residencial, ligada ao fato de a população necessitar de energia para satisfazer necessidades básicas e de bem-estar na forma de conservação de alimentos, iluminação, calor para cozinhar, funcionamento de aparelhos elétricos e eletrônicos.

2.1.1 INÍCIO DO APROVEITAMENTO DA ENERGIA SOLAR

O aproveitamento da energia solar para produção direta de eletricidade teve início em 1839, com Edmond Becquerel. O cientista francês descobriu o efeito fotovoltaico ao observar, em um experimento com uma célula eletrolítica (dois eletrodos metálicos dispostos em uma solução condutora), que a geração de eletricidade aumentava quando a célula era exposta à luz. Foram estudados os comportamentos de diversos materiais nas mesmas circunstâncias, até que, no ano de 1954, Daryl Chapin, Calvin Fuller e Gerald Pearson desenvolveram a primeira célula fotovoltaica de silício, com eficiência de 6%. Ela era capaz de converter energia solar em eletricidade suficiente para alimentar equipamentos elétricos (BARBOSA *et al.*, 2004).

Desde os anos 1990, a evolução do mercado fotovoltaico tem sido bastante intensa, tornando comuns as aplicações em sistemas domésticos, sinalização marítima, eletrificação de cercas e outros. Em 2004, foi finalizado o projeto do então maior sistema fotovoltaico do mundo, o parque solar da Bavária, na Alemanha, de 10 MWp de potência instalada.

A energia fotovoltaica realiza a obtenção de eletricidade pela transformação direta da radiação solar em energia elétrica, com a utilização de materiais semicondutores, quase sempre de silício. São dispositivos constituídos de células fotovoltaicas, reunidas em série e em paralelo, para aumentar a tensão e a potência fornecidas, formando os conhecidos “painéis fotovoltaicos”. Na indústria, as células são classificadas em função da estrutura cristalina do semicondutor, que pode ser monocristalino, policristalino ou amorfo (BARBOSA *et al.*, 2004).

2.1.2 Efeito fotovoltaico

De acordo com Goetzberger & Hoffmann(2006), a tecnologia fotovoltaica é a forma mais direta de converter a radiação solar em energia elétrica. Ela pode produzir eletricidade corrente contínua (CC) e pode ser usada diretamente como energia de corrente contínua, convertida para energia corrente alternada (CA) ou armazenada para uso posterior.

O elemento básico de um sistema solar fotovoltaico é a célula solar que representa a diferença do potencial gerado pelo deslocamento de cargas através de uma estrutura de material semicondutor, o silício, que, em união com o fósforo, é um dopante doador de elétrons, e o boro, por sua vez, um aceitador de elétrons. Formase com esses elementos o que se chama de junção pn. Os átomos livres do lado n (silício mais fósforo) passam ao lado p (silício mais boro), tornando-o negativamente carregado e uma redução de elétrons do lado n o torna eletricamente positivo. Essas cargas aprisionadas geram um campo elétrico permanente e uma intensidade de corrente que atravessa a célula do campo p ao n (GONZALEZ, 2010).

Goetzberger & Hoffmann(2006) definem o efeito fotovoltaico como o surgimento de uma tensão elétrica entre dois eletrodos ligados a um sistema sólido ou líquido em um raio de luz sobre este sistema, em que, praticamente todos os dispositivos fotovoltaicos incorporam uma junção pn de um semicondutor através do qual a fotovoltagem é desenvolvida. O material semicondutor tem de ser capaz para absorver grande parte do espectro solar. Dependendo das propriedades de absorção do material, a luz é absorvida numa região perto da superfície, como é o caso do silício, que é um material semicondutor absorvente. Isto conduz a uma típica estrutura de célula solar, como é apresentado na figura 1.

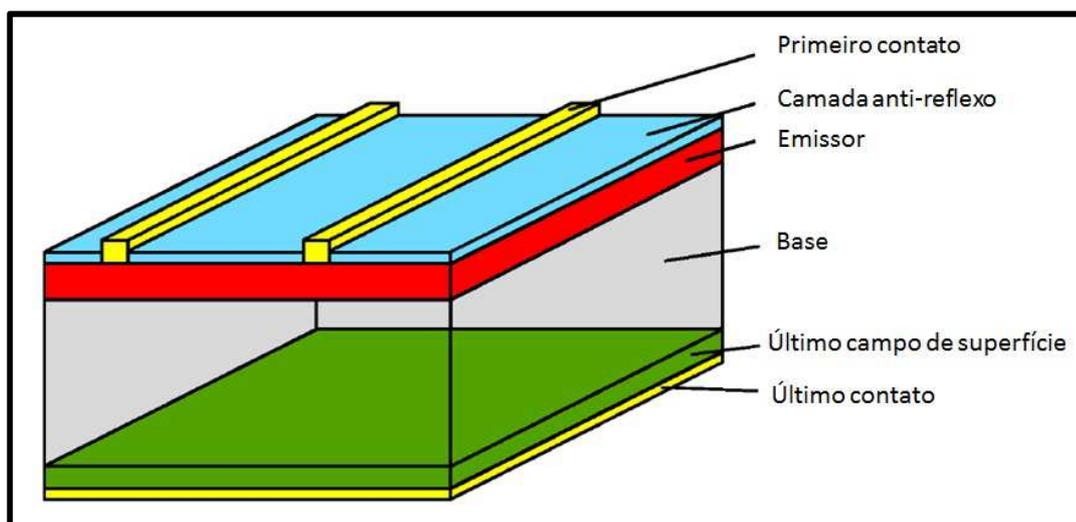


FIGURA 1 - SEÇÃO DE CÉLULA SOLAR

FONTE: ADAPTADO DE GOETZBERGER & HOFFMANN, 2006

Já o potencial teórico fotovoltaico é calculado através do atlas da radiação solar, em combinação com equações que descrevem as estações do ano, horário do dia e variação geográfica da irradiação solar (DEWULF e LANGENHOVE, 2006).

As aplicações de energia solar com potencial fotovoltaico podem ser divididas em sistemas fotovoltaicos independentes ou conectados à rede. No sistema independente, deve haver um sistema de armazenamento integrado, afim de assegurar o fornecimento de energia elétrica em horários sem radiação solar, como à noite, por exemplo. Se os sistemas forem utilizados apenas quando a radiação for suficiente para fornecer energia elétrica, diretamente, este sistema de armazenamento não é necessário.

Sistemas autônomos podem ser implementados com um gerador fotovoltaico como a única fonte de alimentação ou com fontes de energia auxiliares, como os sistemas híbridos, onde os geradores adicionais que empregam combustíveis fósseis (por exemplo, óleo diesel ou gás) e energia renovável (como o vento, a energia hídrica, ou biomassa) complementam a produção de energia fotovoltaica. A escolha da capacidade de armazenamento e do poder relativo de um gerador fotovoltaico com uma fonte de energia auxiliar depende das condições de radiação.

Goetzberger & Hoffmann(2006) mostram que os sistemas fotovoltaicos ligados à rede sempre têm uma conexão com rede pública de energia elétrica através de um inversor. Eles podem ser divididos em dois tipos: sistemas fotovoltaicos descentralizados, ou centralizados.

Os sistemas descentralizados conectados à rede têm uma faixa de potência pequena e são instalados no telhado de edifícios ou integrados em fachadas de edifícios. Neste caso, não é necessário o armazenamento de energia. Em dias ensolarados, o gerador fornece energia, para os aparelhos elétricos da casa. E o excesso de energia é fornecido para a rede pública.

Já nos casos dos sistemas conectados à rede de forma centralizada, eles têm uma potência instalada até alguns MW. Com essas centrais fotovoltaicas é possível alimentar diretamente uma rede de tensão média ou alta. A instalação pode ser feita em edifícios ou em terraços de prédios maiores.

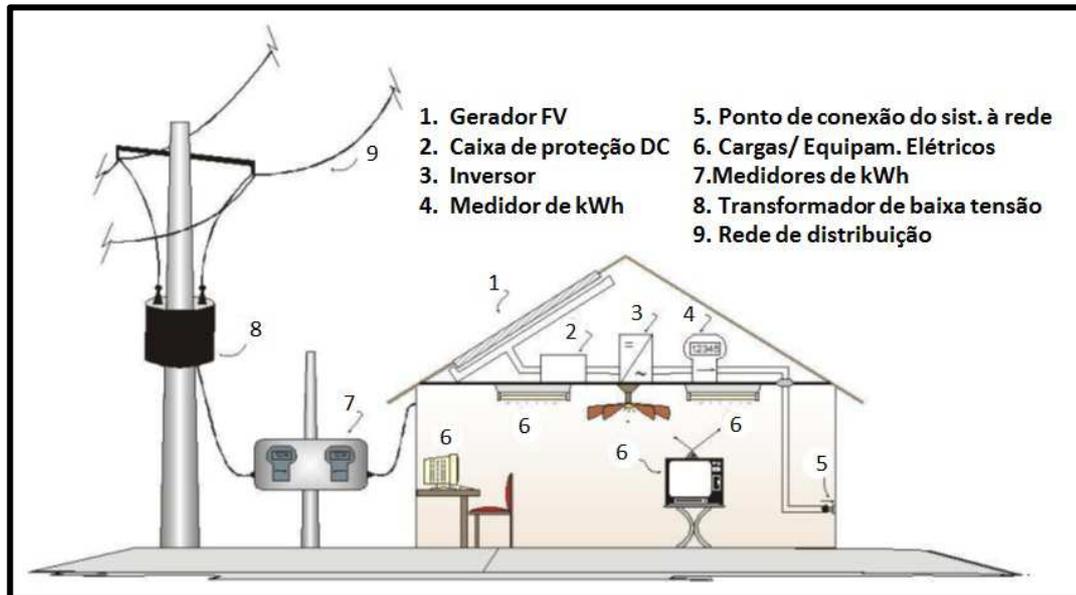


FIGURA 2 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO EM UMA RESIDÊNCIA CONECTADO À REDE ELÉTRICA

FONTE: RODRIGUES, 2005

A grande vantagem do uso do sistema fotovoltaico conectado à rede (SFCR), visualizado na figura 2, é sua simplicidade no projeto de instalação, dado que as baterias, nesse caso, são eliminadas do conjunto, pois toda a potência gerada é destinada à rede de energia elétrica.

Uma instalação conectada à rede se resume ao gerador fotovoltaico, ao inversor e ao transformador que adapta a tensão e a frequência imposta pela rede, além dos equipamentos de controle e proteção (CASTRO GIL *et al.*, 2000).

Segundo Roaf (2006), os sistemas solares fotovoltaicos já são uma tecnologia economicamente viável em muitas partes do mundo. Mais do que isso, são um investimento sensato para os proprietários típicos de casas que querem se proteger de futuras mudanças relativas à energia e ao clima. Eles devem começar a considerar vários fatores como que as mudanças climáticas estão elevando as taxas de carbono que tornarão a energia mais cara, o esgotamento dos combustíveis fósseis aumentará os preços de petróleo e gás, pois temos cerca de quarenta anos de reservas de petróleo convencionais e cerca de sessenta anos de reservas de gás. Por volta de 2020, a escassez de petróleo e gás fará seus preços muito imprevisíveis. Outros fatores são que as mudanças climáticas mais severas tornarão

o aquecimento e resfriamento de nossas casas mais caros em termos energéticos. de que, os sistemas fotovoltaicos podem fornecer eletricidade durante as interrupções no fornecimento de energia convencional resultantes das condições ruins de fornecimento. Tendo em vista que, há uma diversidade de usos para os quais um fornecimento seguro de energia deveria ser essencial; esses incluem bombeamento de água e o acionamento de portas e portões elétricos, sistemas de segurança de elevadores, alarmes de fumaça e incêndio, iluminação de emergência e de sistemas de segurança, sistemas de computadores e sistemas de comunicação.

2.1.3 Tecnologia fotovoltaica

Algumas tecnologias de módulos com potencial fotovoltaico disponíveis no mercado são as de silício cristalino (c-Si), sendo silício monocristalino (m-Si) e silício policristalino (p-Si), as de silício amorfo hidrogenado (a-Si), as de telureto de cádmio (CdTe) e as de disseleneto de cobre e índio (CIS).

Segundo Rüter (2004), a tecnologia c-Si é tradicional e dominante no mercado fotovoltaico, apresentando a maior escala de produção a nível comercial. Nas células fotovoltaicas de silício monocristalino (m-Si), o monocristal é acrescentado a partir de um banho de silício fundido de alta pureza (Si=99,99% a 99,9999%) em reatores sob atmosfera controlada e com velocidades de crescimento do cristal extremamente lentas (da ordem de cm/hora). O silício policristalino (p-Si) apresenta menor eficiência de conversão, tendo um processo de preparação das células menos rigoroso. A eficiência, no entanto, cai um pouco em comparação às células de silício monocristalino. O material de partida é o mesmo que para o m-Si, que é fundido e posteriormente solidificado direcionalmente, o que resulta num cristal com grande quantidade de grãos ou cristais, no contorno dos quais se concentram os defeitos que tornam este material menos eficiente do que o m-Si em termos de conversão fotovoltaica (SALAMONI, 2004).

As tecnologias de silício amorfo hidrogenado (a-Si) difere das demais estruturas de silício por apresentar um alto grau de desordem na estrutura dos átomos. A utilização de silício amorfo para uso em painéis solares tem mostrado

vantagens nas propriedades elétricas e no processo de fabricação, por apresentar uma absorção da radiação solar na faixa do visível e por ser de baixo custo.

Com relação aos painéis de telureto de cádmio (CdTe), eles se apresentam na forma de filmes finos e possuem baixos custos para produções em grandes escalas e esta tecnologia tem boas chances de ser um sério competidor no mercado fotovoltaico para a geração de potência elétrica.

O disseleneto de cobre e índio (CIS) possui grande potencial para atingir eficiência energética elevada, além de ser utilizado na forma de filmes finos, reduzindo material e, conseqüentemente, custos.

De acordo com cada tecnologia, a tabela 1 apresenta algumas características com relação à potência, área e eficiência dos módulos.

Tecnologia	Fabricante	Potência Nominal (W)	Área do módulo (m ²)	EFF STC ¹ (%)
m-Si	BP Solar	170	1,26	13,5
a-Si	Bekaert ECD Solar Systems	64	1,12	6,3
p-Si	BP Solar	75	0,64	11,6
CdTe	First Solar	50	0,72	6,9
CIS	Wurth Solar	60	0,73	8,2

TABELA 1 – CARACTERÍSTICAS DAS TECNOLOGIAS DE ALGUNS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS DISPONÍVEIS NO MERCADO

FONTE: ADAPTADO DE SALAMONI

2.1.4 Movimento solar e direcionamento dos painéis fotovoltaicos

No dia a dia observa-se o movimento aparente do Sol num caminho que vai de leste a oeste. Nota-se também as variações que ocorrem na duração dos dias e das noites em diferentes épocas do ano em algumas regiões. Dentre os movimentos que a Terra realiza, os mais conhecidos são o de rotação e o de translação (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2007).

Sabe-se que o nosso planeta movimenta-se ao redor do Sol em uma órbita elíptica. A posição relativa entre a estrela e a Terra é convenientemente

¹ STC - *Standard Test Conditions*, significa que o respectivo valor da potência nominal dos módulos é atingido quando submetido a uma radiação de 1000 W/m² e a uma temperatura de 25°C (CARR, 2004).

representada por meio da esfera celeste. O plano equatorial intercepta a esfera celeste no equador celeste, e o eixo polar nos polos celestes. O movimento da Terra ao redor Sol é então representado como um movimento aparente do Sol ao redor da Terra.

O eixo em torno do qual a Terra realiza o movimento de rotação, chamado de eixo polar, possui uma inclinação de $23,45^\circ$ em relação à normal ao plano da elíptica. O ângulo compreendido entre o plano do equador terrestre e o plano da elíptica é denominado de declinação solar (δ) e sua variação ao longo do ano compreende o intervalo de $-23,45^\circ < \delta < 23,45^\circ$. Um método aproximado para o cálculo da declinação, em graus, é apresentado pela equação 1²:

$$\delta = 23,45 \times \text{sen} \left(360 \times \frac{284 + d_n}{365} \right) \quad (\text{eq. 1})$$

A declinação solar é zero nos equinócios de outono (20/21 de março) e primavera (22/23 de setembro). Nessas datas, o dia e a noite possuem durações iguais em todas as regiões do globo terrestre. No solstício de inverno (21/22 de junho no hemisfério sul) a declinação solar é igual a $+23,45^\circ$, correspondendo ao dia mais curto e a noite mais longa do ano. Finalmente, no solstício de verão (21/22 de dezembro no hemisfério norte) a declinação é igual a $-23,45^\circ$ e corresponde ao dia mais longo do ano. Vale ressaltar que essa análise é válida para o hemisfério sul. No do norte, as datas dos equinócios e solstícios se invertem, assim como a duração do dia e da noite durante os solstícios. A figura 3 ilustra a relação entre o Sol e a Terra.

² Sendo d_n o dia juliano do ano, $1 < d_n < 365$ (01 de janeiro até 31 de dezembro).

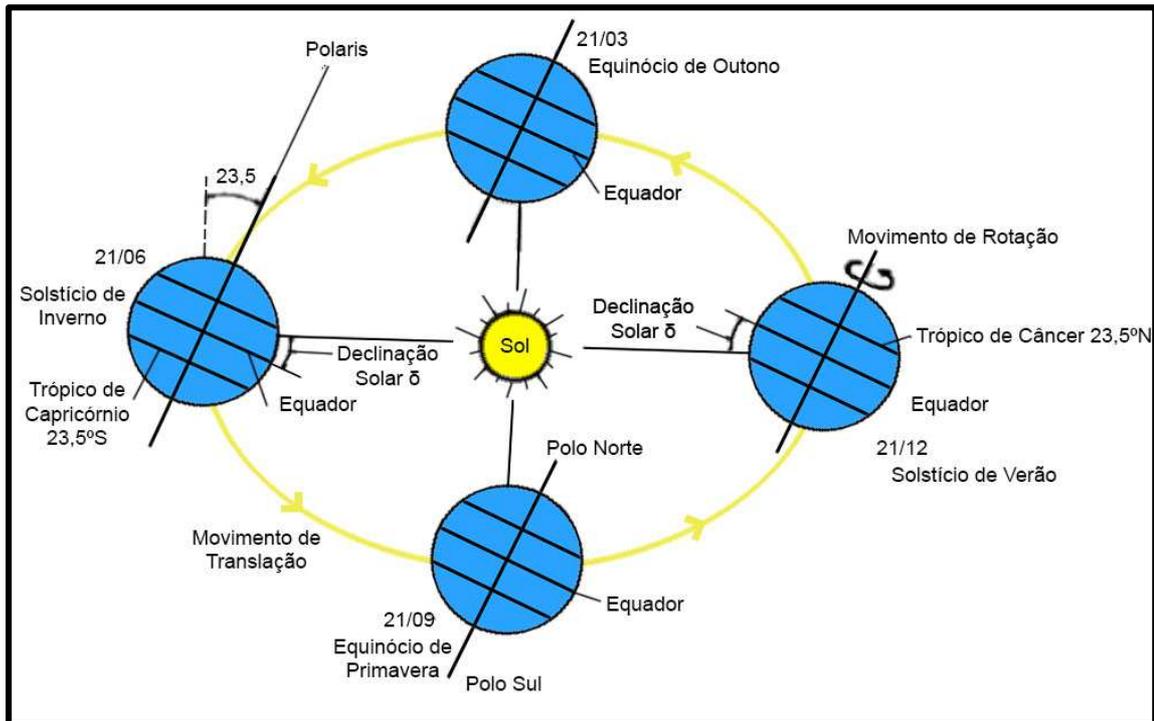


FIGURA 3 - ÓRBITA DA TERRA EM TORNO DO SOL: POSIÇÃO DA TERRA COM RELAÇÃO AO SOL NOS SOLSTÍCIOS E EQUINÓCIOS

FONTE: CEPEL, 2004

O movimento aparente do Sol ao longo do dia e do ano, como consequência dos movimentos de rotação e translação da Terra, é semelhante ao de uma espiral quase paralela (FROTA, 2004). Na Terra, esse percurso solar corresponde à zona situada entre os trópicos de Câncer e Capricórnio, demorando seis meses em cada direção. O equador terrestre e o celeste estão contidos no mesmo plano e representam os dois limites do movimento aparente do Sol em sua contínua trajetória ao redor da Terra.

Para melhor explicar o que acontece em termos de incidência do Sol sobre a Terra, apresentam-se as figuras 4 a 7. Na 4 mostra-se a esfera terrestre, com o equador, trópicos de Câncer e Capricórnio, os pólos Norte e Sul e o Sol nas três posições particulares: solstício de junho, equinócios de março e setembro e solstício de dezembro. Nas figuras 5 a 7 observa-se a incidência de radiação solar em cada época do ano.

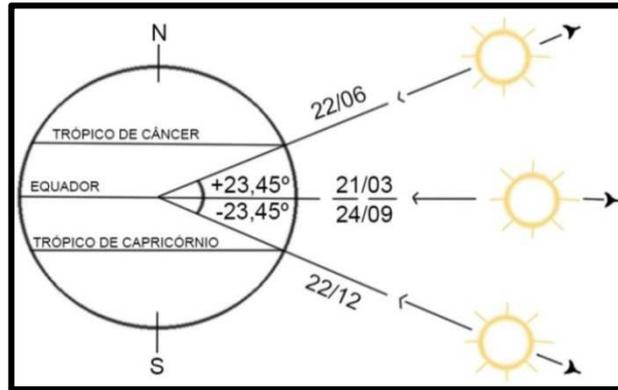


FIGURA 4 - A TERRA E O SOL NAS POSIÇÕES DOS SOLSTÍCIOS E DOS EQUINÓCIOS

FONTE: ADAPTADO DE NADAL, 2007

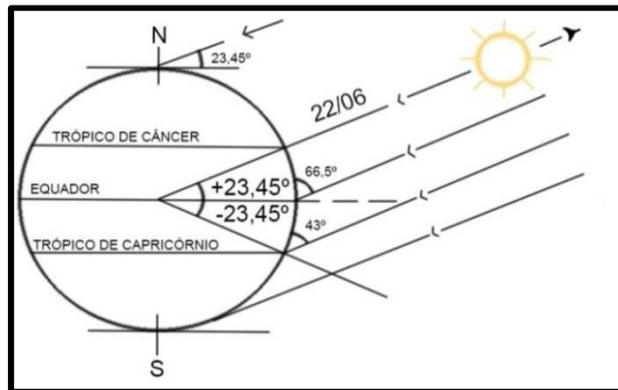


FIGURA 5 - SOLSTÍCIO DE JUNHO – INCIDÊNCIA DE SOL AO MEIO-DIA

FONTE: ADAPTADO DE NADAL, 2007

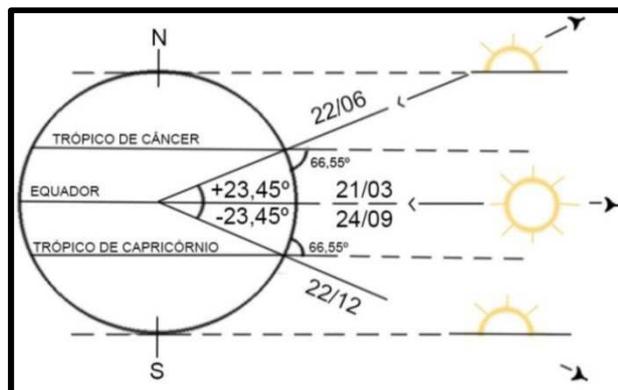


FIGURA 6 - EQUINÓCIOS DE MARÇO E DE SETEMBRO

FONTE: ADAPTADO DE NADAL, 2007

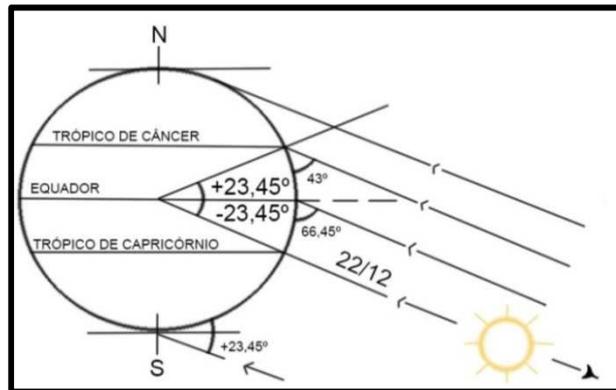


FIGURA 7 - SOLSTÍCIO DE DEZEMBRO – INCIDÊNCIA DE SOL AO MEIO-DIA

FONTE: ADAPTADO DE NADAL, 2007

Para se entender o aproveitamento solar para geração de energia é necessário conhecer algumas relações geométricas entre os raios solares e a superfície terrestre, mais especificamente sobre uma superfície S qualquer, descrito por meio de vários ângulos definidos na figura 8.

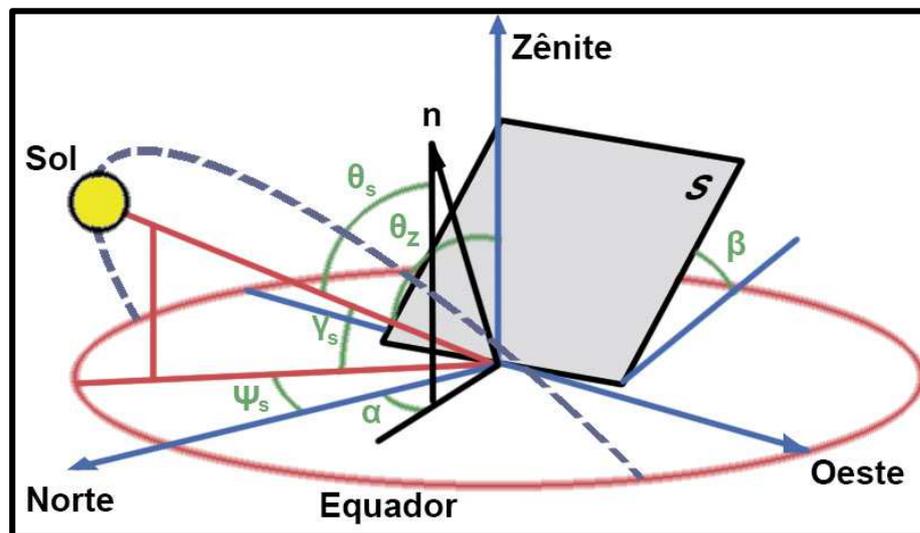


FIGURA 8 - RELAÇÕES GEOMÉTRICAS ENTRE O SOL E A TERRA

FONTE: ADAPTADO DE NADAL, 2007

- Ângulo de incidência (θ_s): ângulo compreendido entre o raio solar e a normal (n) à superfície de captação.

- Altura solar (γ_S): ângulo formado entre o raio solar e a sua projeção sobre o plano horizontal.
- Ângulo azimutal da Superfície (α): ângulo compreendido entre a projeção da normal à superfície no plano horizontal e a direção Norte-Sul. O deslocamento angular é tomado a partir do Norte e está compreendido entre -180° e 180° , sendo considerado positivo quando a projeção se encontra à esquerda do Norte e negativo quando se encontra à sua direita.
- Ângulo azimutal do Sol (ψ_S): ângulo formado entre a projeção do raio solar no plano horizontal e a direção Norte-Sul. Obedece à mesma convenção citada para o ângulo azimutal da superfície.
- Inclinação da superfície (β): ângulo formado entre o plano da superfície coletora e a horizontal.
- Ângulo zenital (θ_Z): ângulo formado entre o raio solar e o Zênite; equivale à distância angular entre o feixe solar e a vertical do local de incidência.
- Ângulo horário (ω): ângulo entre o meridiano do Sol e o meridiano do local. O ângulo horário (ω) considera todo o intervalo de horas entre o nascer e o pôr-do-sol, considerado negativo pela manhã e positivo à tarde, como ilustrado na figura 9. Cada hora angular corresponde a um deslocamento de 15° .

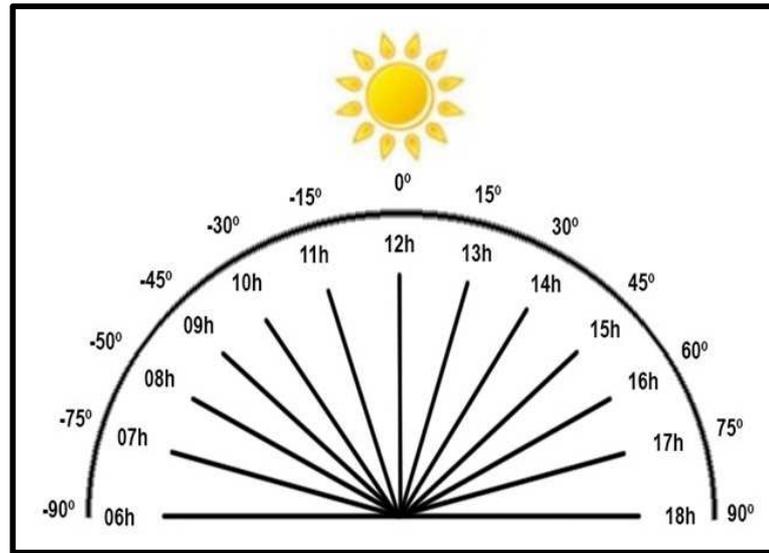


FIGURA 9 - ÂNGULOS HORÁRIOS COMPREENDIDOS DENTRO DO INTERVALO DE UM DIA

FONTE: ADAPTADO DE MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA

A otimização da eficiência da energia solar coletada pelos painéis fotovoltaicos depende do posicionamento correto deles. Cada um deverá ser inclinado para o lado oposto ao hemisfério onde se encontra e o ângulo de elevação estabelecido em função da latitude de sua localização. Como o Sol se desloca igualmente por ambos os hemisférios, permanecendo no Norte entre 22 de março e 22 de setembro, e no Sul de 23 de setembro a 21 de março, a posição horizontal, ou próxima dela, é a mais correta para os painéis fotovoltaicos, pois assim propiciará o máximo de captação da radiação solar ao longo do ano.

Para a análise do efeito da latitude sobre o ângulo de inclinação dos painéis fotovoltaicos, considerou-se como este sendo deslocado desde o Equador, pois a posição horizontal significa a melhor situação, até alcançar um dos trópicos, onde é indicado um ângulo igual à latitude.

A figura a seguir exemplifica a intensidade da radiação solar e o tempo de permanência do Sol acima da linha do horizonte de uma determinada localidade (FROTA, 2004). Observa-se o movimento aparente do Sol e as horas em que ele se encontra acima do horizonte para localidades próximas ao Equador e para localidades próximas à latitude de 23,5° S.

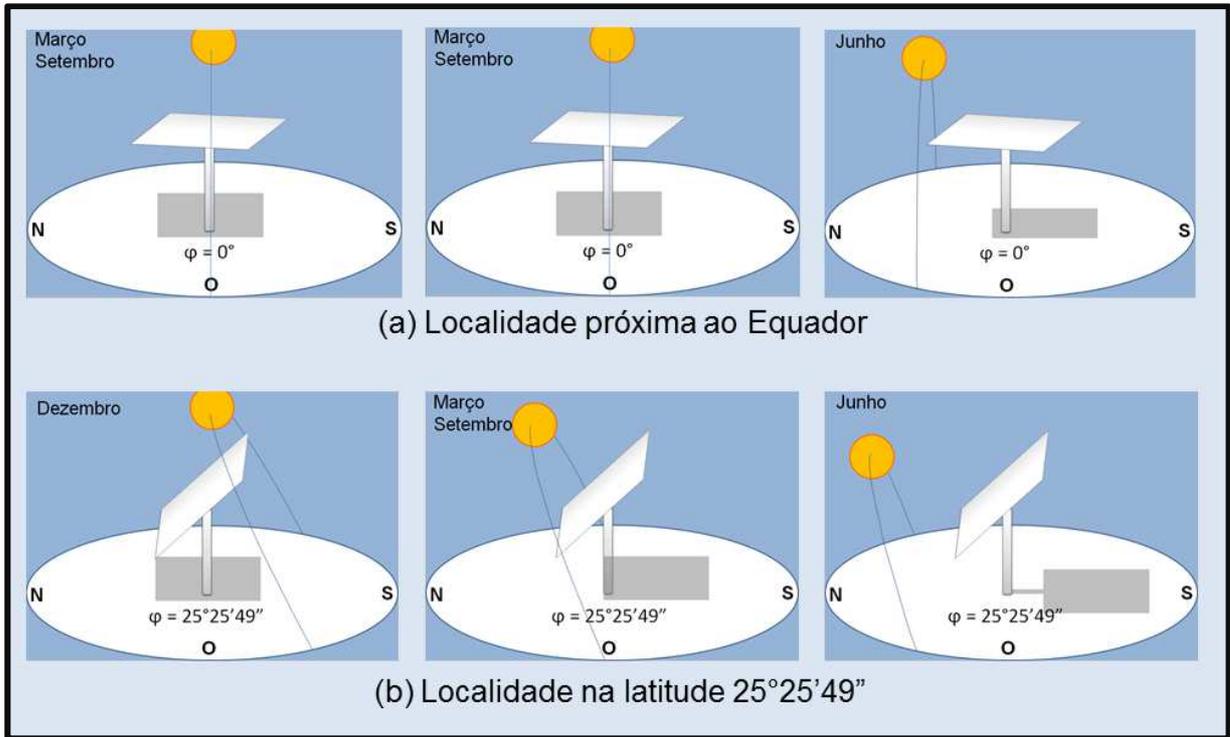


FIGURA 10 - MOVIMENTO APARENTE DO SOL E TEMPO DE INSOLAÇÃO PARA DUAS LOCALIDADES

FONTE: ADAPTADO DE FROTA, 2004

2.2 IRRADIAÇÃO SOLAR NO BRASIL

De acordo com Colle & Pereira (1998), existem diversas formas para se estimar a irradiação solar na superfície, como o pioneiro método de Angström e suas variantes, os métodos estatísticos baseados em satélites e os baseados em modelos físicos. Diferentemente dos estatísticos, que necessitam de dados em longas séries anuais e fornecem apenas médias no período, os físicos são capazes de fornecer dados horários, incorporando quaisquer variações climáticas relevantes.

O atlas é uma consolidação de dados de irradiação global, computados com o algoritmo do modelo físico BRAZILSR, com base em informações de satélite geostacionário. Este método oferece a vantagem adicional de computar dados atuais de boa confiabilidade.

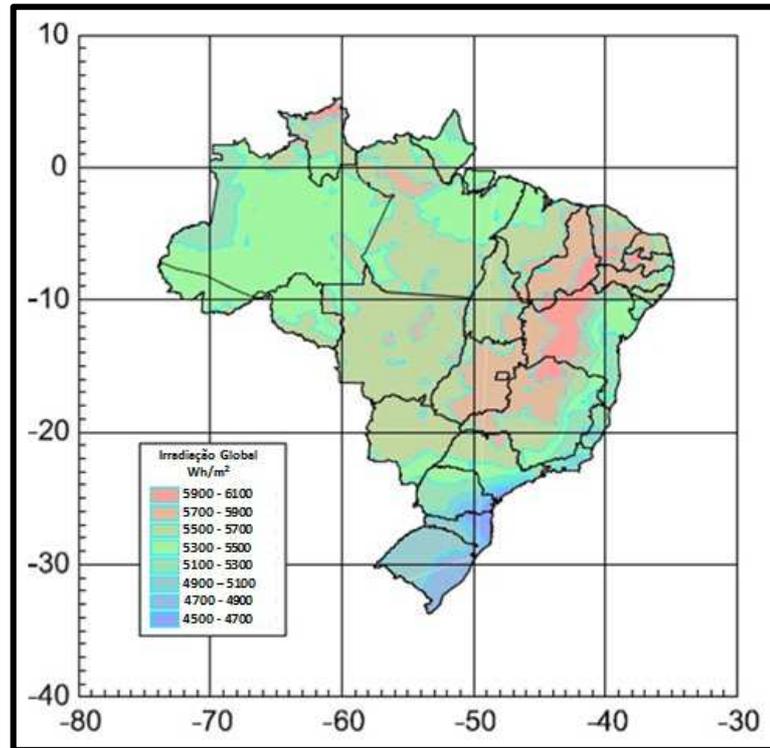


FIGURA 11 - MAPA DA IRRADIAÇÃO SOLAR MÉDIA NO BRASIL

FONTE: COLLE & PEREIRA, 1998

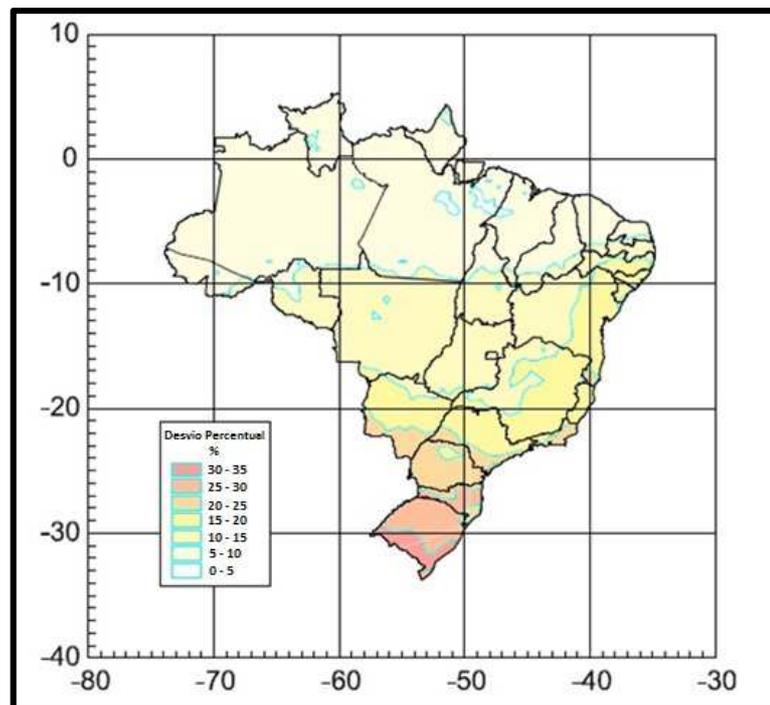


FIGURA 12 - MAPA DA VARIABILIDADE DIÁRIA DA IRRADIAÇÃO SOLAR

FONTE: COLLE & PEREIRA, 1998

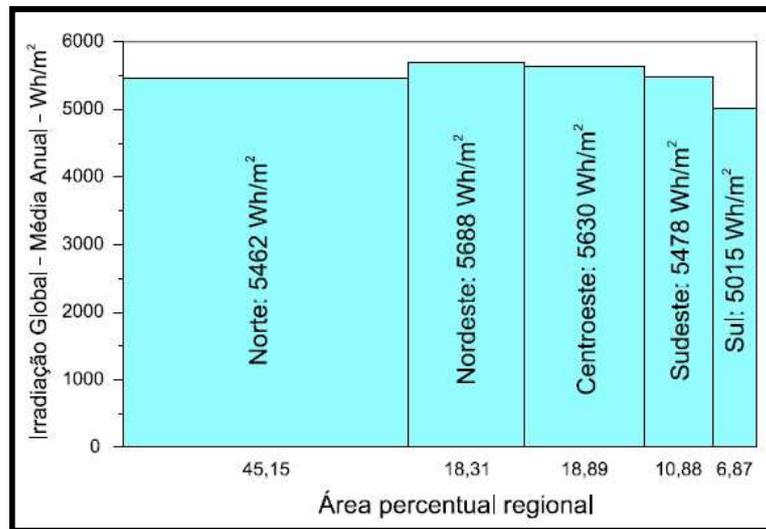


FIGURA 13 - DISTRIBUIÇÃO DA MÉDIA DE IRRADIAÇÃO GLOBAL POR REGIÕES DO PAÍS

FORTE: COLLE & PEREIRA, 1998

2.3 AIRBORNE LASER SCANNER - ALS

Um dos principais fatores para a estimativa do potencial fotovoltaico está associado à geometria e exposição da superfície ao Sol. Para se estimar o potencial fotovoltaico de uma área urbana, e avaliar a viabilidade de seu aproveitamento dentro da matriz energética, é necessário conhecer a geometria dos telhados nos quais podem ser instalados os painéis solares. Isto pode ser feito mediante levantamentos de campo, utilizando equipamentos e técnicas topográficas, por exemplo. Outra opção, mais recentemente disponibilizada, é o uso da tecnologia de LIDAR aerotransportado (ALS - *Airborne LASER Scanner*).

2.3.1 O sistema ALS

Segundo Ackermann (1999), o desenvolvimento do ALS iniciou entre as décadas de 1970 e 1980. Kersting (2006) entende que, nos anos de 1990, com o desenvolvimento de técnicas mais avançadas de posicionamento com satélites GPS, pequenos sistemas de medição inercial, com menor custo relativo e computadores

portáteis, a comercialização da tecnologia ALS tornou-se possível, bem como a obtenção de maior precisão e consistência na aquisição dos dados em plataformas aéreas

Quando se conhece a velocidade da onda eletromagnética, a partir da medida do tempo de ida e retorno de um pulso, é possível determinar a distância entre pontos. Este tipo de medição de distância passou a ser usada nos distanciômetros eletrônicos e, posteriormente, em estações totais, sendo o princípio de funcionamento de alguns sistemas ALS.

2.3.2 Componentes

O ALS é um sensor remoto ativo que, assim como o radar, emite energia em direção ao objeto para depois medir a parcela refletida desta energia. No caso, o ALS mede, além da intensidade do sinal refletida, o tempo de ida/retorno do pulso emitido.

Os sistemas ALS são compostos basicamente por: unidade de medição a LASER: mecanismo de geração, emissão e recepção do pulso; unidade de posicionamento: receptor GPS montado sobre uma plataforma que permite a determinação das coordenadas X, Y e Z dos pontos medidos; unidade de medição inercial IMU - *Inertial Measurement Unit*: composta por acelerômetros (para obtenção da aceleração linear) e giroscópios (para obtenção da orientação da antena do ALS no momento exato em que cada pulso é transmitido e recebido, por meio da determinação dos ângulos *roll*, *pitch* e *heading* ou *yaw*).

Após a aquisição dos dados, as informações são pós-processadas considerando os dados de posicionamento da antena obtidos do GPS e da altitude obtida da IMU, resultando em um arquivo que indica a trajetória da aeronave e da antena LASER durante todo o tempo de duração da coleta de dados. O arquivo de saída documenta a posição da aeronave (latitude, longitude e altitude elipsoidal) e a orientação do sensor, indexadas pelo tempo do GPS (JENSEN, 2009). A figura 14 ilustra o sistema de medição inercial e os ângulos de inclinação do avião medidos.

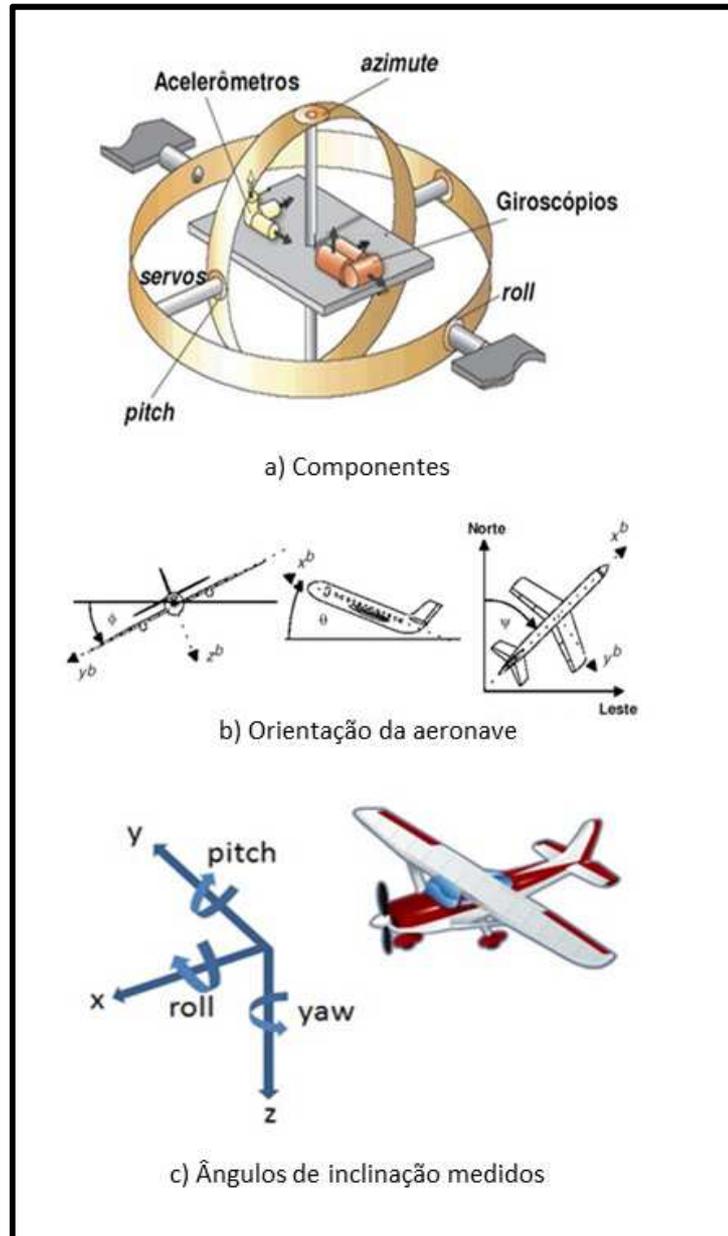


FIGURA 14 - SISTEMA DE MEDIÇÃO INERCIAL

FONTES: A) E B) SANTOS (2010); C) NATIONAL INSTRUMENTS (2011)

2.3.3 Princípio de Funcionamento

A aquisição de dados por um sistema ALS é feita por uma aeronave que sobrevoa uma região, enquanto que o equipamento LIDAR, a bordo da mesma, efetua uma varredura no chão em direção perpendicular à direção do voo, determinando a distância ao terreno. Esta distância é calculada como uma função do

tempo gasto pelo raio LASER para ir do equipamento até o terreno e retornar ao equipamento, com a velocidade da luz (MACHADO, 2006). A reflexão do sinal pode também ser armazenada e usada possibilitando, junto com a informação da altitude, classificar a cobertura da superfície terrestre. A figura 15 ilustra o princípio de funcionamento.

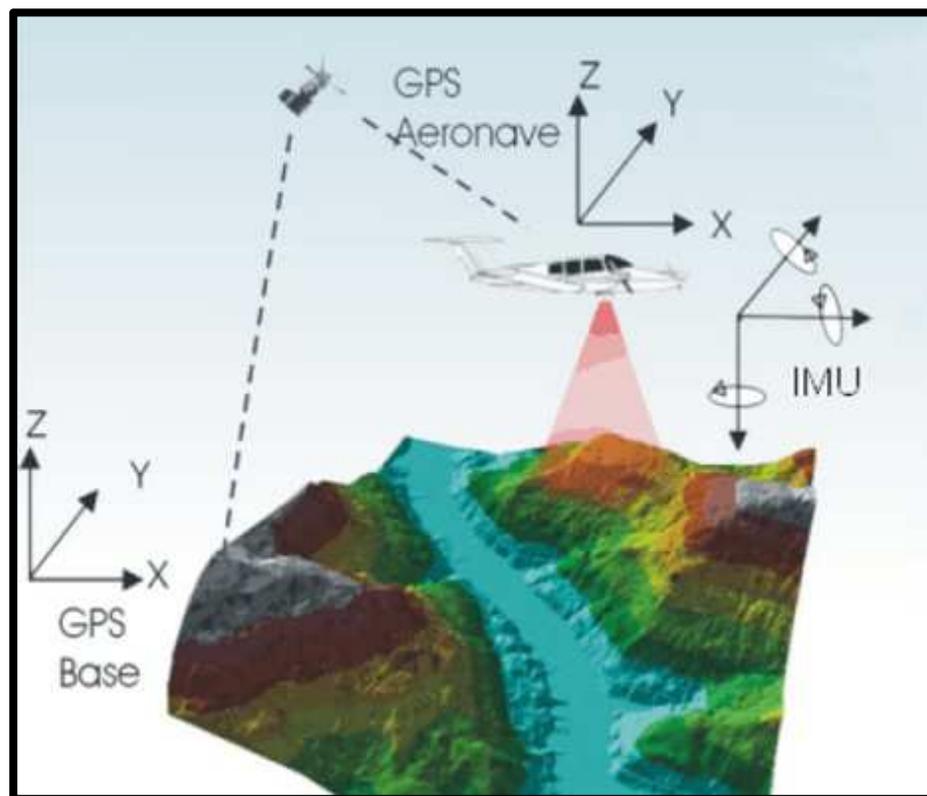


FIGURA 15 - PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DE UM SISTEMA LASER AEROTRANSPORTADO

FONTE: KERSTING (2006)

Os pulsos LASER são gerados por um componente denominado gerador de pulsos, e emitidos pelo sistema com o auxílio de um espelho de varredura que redireciona o pulso (com uma frequência de varredura e diâmetro de espessura) para a superfície de interesse a ser mapeada (SANTOS, 2010).

2.3.4 Características

A maioria dos sistemas ALS usados para mapeamento topográfico utilizam a radiação eletromagnética no infravermelho próximo, na região de 1040 a 1060nm. Por serem sensores ativos, é possível utilizá-los durante qualquer período do dia (inclusive à noite, se necessário), pois independe da iluminação solar passiva. A frequência de repetição do pulso ultrapassa 100.000 pulsos por segundo. Cada pulso desloca-se à velocidade da luz ($c = 3 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$). O tempo de percurso de um pulso (t) é dado por (JENSEN, 2009):

$$t = 2 \frac{D}{c} \quad (\text{eq. 2})$$

Sendo D a distância entre o sensor ALS e o objeto. Pode-se então chegar à distância, rearranjando a equação:

$$D = \frac{1}{2} tc \quad (\text{eq. 3})$$

A área de cobertura de cada pulso é aproximadamente circular e varia com o ângulo de varredura e a topografia do terreno. O diâmetro da visada instantânea LASER (D_{inst}) no terreno é calculado por (JENSEN, 2009):

$$D_{inst} = \frac{h}{\cos^2(\theta_{inst})} \gamma \quad (\text{eq. 4})$$

Sendo:

h = altura de voo

θ_{inst} = ângulo de varredura instantâneo

γ = divergência do feixe LASER

Como consequência da divergência do pulso, cada pulso LASER transmitido pode resultar em múltiplos retornos. O registro da primeira e da última reflexão de cada pulso, por exemplo, pode permitir a detecção de alturas de árvores, linhas de

transmissão, construções, entre outros. O pós-processamento dos dados originais irá resultar em diversos arquivos de LIDAR, que se referem a: primeiro retorno, possíveis retornos intermediários, último retorno e intensidade (que facilita a identificação dos objetos nas imagens). O resultado dos registros é uma nuvem de pontos (*point cloud*). A figura 16a ilustra os registros de primeiro e último retornos em edificações, superfície topográfica e vegetação de grande porte. A figura 16b ilustra os múltiplos retornos de uma vegetação de grande porte devido à divergência do feixe.

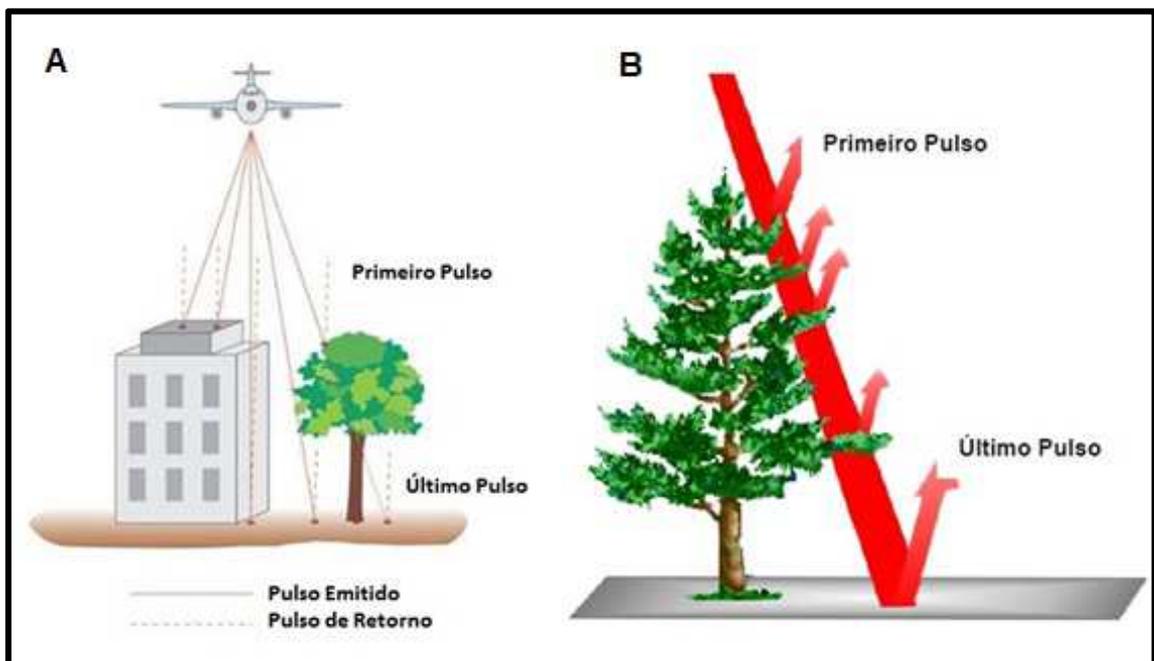


FIGURA 16 - RETORNOS

FONTES: 16A - ADAPTADO DE SANTOS (2010); 16B – KERSTING (2006)

Quanto ao tipo de perfilamento gerado pela varredura, ele é dependente do espelho de varredura que compõe o sistema. Existem, basicamente, 3 tipos de espelhos de varredura: osciladores, de polígono de rotação e do tipo Palmer. Os espelhos osciladores (figura 17a) produzem uma configuração de perfilamento denominada linha em zig-zag (figura 18a). Os espelhos de polígono de rotação (figura 17b) produzem uma varredura unidirecional com linhas paralelas (figura. 18b). Os espelhos do tipo Palmer (figura 17c) produzem efeitos de modelos elípticos na superfície (figura 18c).

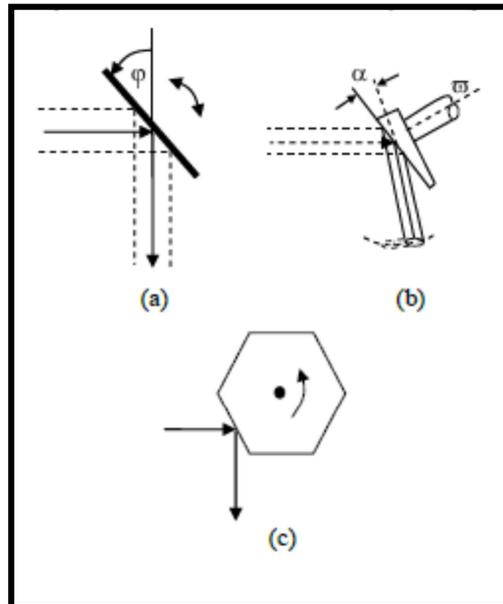


FIGURA 17 - TIPOS DE ESPELHOS DE VARREDURA LASER

FONTE: SANTOS (2010)

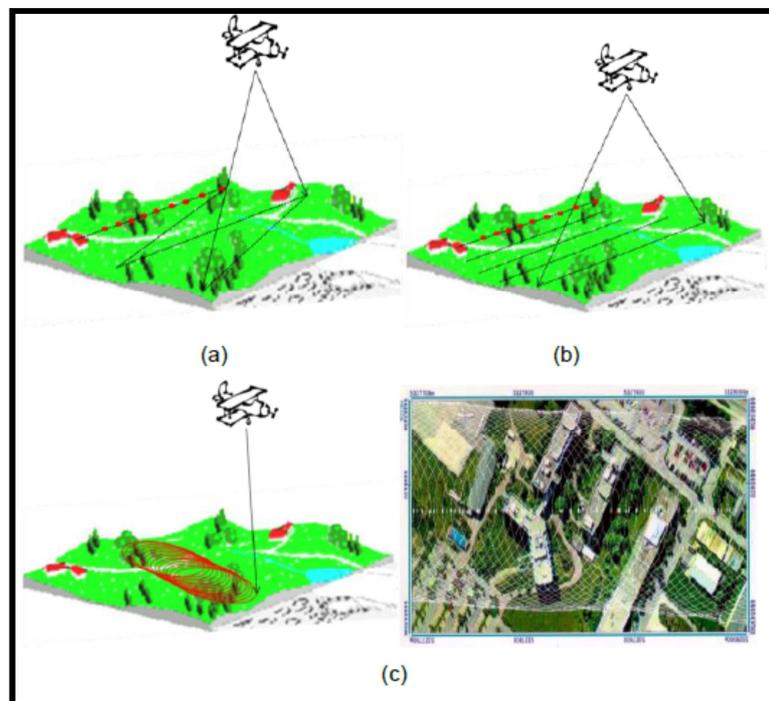


FIGURA 18 - PADRÕES DE VARREDURA LASER EM FUNÇÃO DO ESPELHO DO SENSOR

FONTE: SANTOS (2010)

As análises de precisão envolvem muitos parâmetros: as características dos

equipamentos utilizados, a altura de voo, tipo de terreno e declividade e sistema inercial de navegação (INS) empregado. Em qualquer caso pode ser dito que o desvio padrão de cada componente das coordenadas de um ponto varia entre 10 cm e 50 cm, sendo que a componente altimétrica é a mais precisa (MACHADO, 2006).

2.3.5 Imagem Intensidade

Grande parte dos sistemas ALS fornecem um arquivo de intensidade com os dados de múltiplos retornos. Em muitos casos, a intensidade registrada não é a integração dos ecos que retornaram de todos os pulsos, mas apenas os seus máximos. Deve-se levar em conta que o feixe LASER é monocromático e tem uma largura de banda extremamente pequena (por exemplo de 2 a 5 nm).

2.4 MODELOS DIGITAIS

O produto de uma varredura a LASER aerotransportado apresenta, além das informações planimétricas do terreno, as informações das elevações neste mesmo espaço. O pulso incide nas feições naturais, como terreno, vegetação, ou nas feições executadas pelo homem, como construções, etc., que estejam presentes nesta região (BURROUGH, 1989 *apud* SCHIMALESKY, 2007). De acordo com Haala *et al.* (1999), um Modelo Digital de Terreno (MDT) armazena as altitudes dos pontos na superfície do terreno, enquanto que o Modelo Digital de Superfície (MDS) contém outros objetos, como árvores, edificações, entre outros (figura 19).

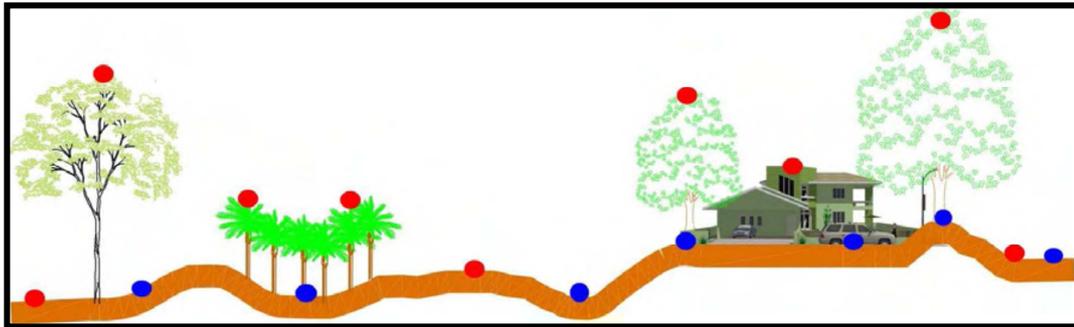


FIGURA 19 - DIFERENÇA ENTRE O MDS (EM VERMELHO) E MDT (EM AZUL)

FONTE: TOMÁS (2010)

Um terceiro modelo, que armazena apenas a altura dos objetos acima do MDT, pode ser obtido calculando a diferença entre o MDS e o MDT. Este modelo é conhecido como MDS normalizado (WEIDNER e FÖRSTNER, 1995).

O processo de geração de modelos de terreno possui três etapas principais, sendo a primeira denominada amostragem, abrangendo a coleta de pontos para a geração do modelo, a segunda chamada de interpolação, que corresponde à criação do modelo especificamente, e a última relacionada às aplicações do modelo (FELGUEIRAS, 2001).

2.5 SEGMENTAÇÃO DE IMAGENS

As imagens de sensoriamento remoto e a grade altimétrica do LIDAR serão utilizadas para delimitar os contornos dos telhados. A segmentação de imagens é um procedimento computacional que permite subdividir a imagem em regiões homogêneas, que se espera correspondam aos objetos de interesse, ou partes deles. O nível até o qual essa subdivisão deve ser realizada depende do problema sendo resolvido. Ou seja, a segmentação deve parar quando os objetos de interesse na aplicação tiverem sido isolados (GONZALEZ & WOODS, 2010). Na aplicação da segmentação, devem ser definidos dois limiares: de similaridade (limiar abaixo do qual duas regiões são consideradas similares e agrupadas em uma única região) e área (valor de área mínimo, representado em número de pixels, para que uma região

seja individualizada).

Os algoritmos de segmentação são geralmente baseados na análise da descontinuidade ou da similaridade entre “pixels”. Existem diferentes estratégias para efetuar esta divisão, sendo as mais comuns a agregação de pixels similares (similiaridade) e contíguos e a detecção de fronteiras entre objetos por extração de bordas (descontinuidade).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A ideia básica deste método é a extração semiautomática de telhados de edificações utilizando dados LIDAR para que se possa verificar a disponibilidade da implantação de painéis solares fotovoltaicos em regiões urbanas. Neste capítulo, serão apresentadas as áreas de estudo, os materiais e os métodos utilizados.

3.1 ÁREAS DE ESTUDO

A realização da pesquisa ocorreu em duas etapas distintas, para três áreas de estudo. Na primeira etapa, a área de estudo selecionada está localizada no Centro Politécnico, campus da Universidade Federal do Paraná, situado no bairro Jardim das Américas, em Curitiba. Está ilustrado na figura 20 um mapa de localização da área de estudo 1 e na figura 21 há uma ortofoto da mesma área de estudo. Utilizando-se técnicas topográficas, realizou-se o levantamento das áreas de cobertura de algumas edificações. Foram levantados o perímetro e alturas dos pontos mais baixo e mais alto dos telhados. Com estes dados, foi calculado o potencial fotovoltaico para essas coberturas.

O método, apesar de eficiente e de fácil execução, torna-se inviável quando aplicado a grandes áreas, pelo dispêndio de tempo em campo e extenso memorial de cálculo a ser executado. Houve a decisão de realizar os dois métodos, simplesmente, para comparação de resultados e visualização das diferenças na fase intermediária.

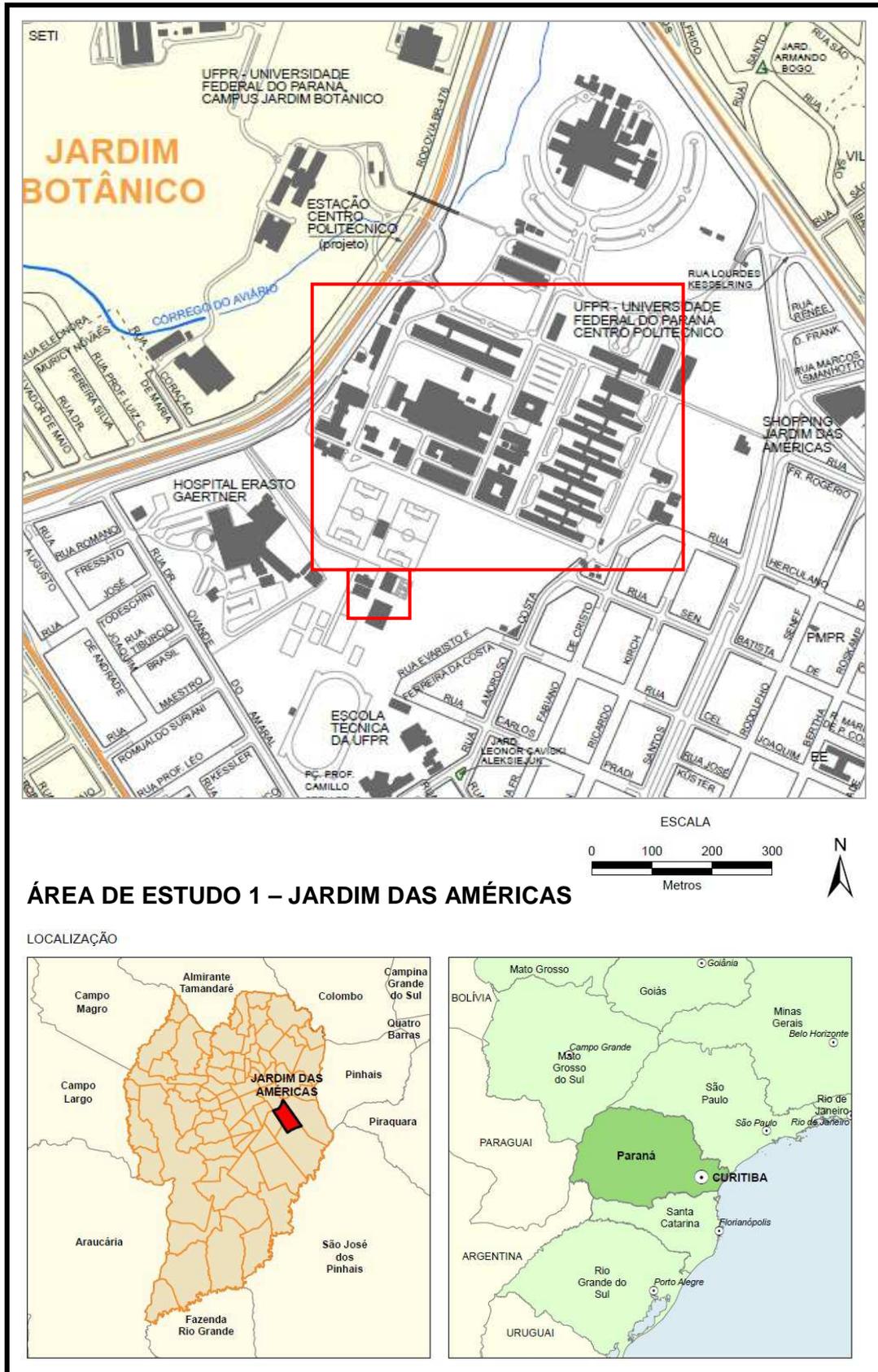


FIGURA 20 – LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO 1

FONTE: ADAPTADO DE IPPUC



FIGURA 21 – ÁREA DE ESTUDO 1

FONTE: ENGESAT

Nesta segunda etapa, foram selecionadas duas áreas de estudos localizadas no bairro Água Verde, em Curitiba.

Visando a avaliação de potencial fotovoltaico de coberturas das edificações de forma rápida, propôs-se utilizar dados de sensores remotos de forma a não ser necessário o levantamento em campo, além de implementar computacionalmente o memorial de cálculo. Esta área de estudo foi selecionada por se tratar de uma região onde há componentes de uma cena urbanizada completa por edificações. Na figura 22 observa-se o mapa de localização das áreas de estudo 2 e 3.

A figura 23 ilustra a área coberta pela ortofoto. Os retângulos vermelhos assinalam as regiões selecionadas para aplicação da metodologia. A seleção desta área se deu em função da menor predominância de árvores e prédios, conseqüentemente, de áreas com menos sombras e oclusões.



FIGURA 23 – ÁREA COBERTA PELA ORTOFOTO

FONTE: ESTEIO ENGENHARIA E AEROLEVANTAMENTOS

3.2 MATERIAIS

Para a realização das etapas foram utilizados dados multiespectrais provenientes de ortofoto ou de imagem de satélite, e dados altimétricos provenientes do sistema ALS e, somente na segunda etapa, foi utilizado um equipamento topográfico.

3.2.1 Fotografia aérea

A ortofoto utilizada para realização do estudo possui resolução espacial de 30 cm e foi gerada a partir de uma fotografia aérea adquirida por uma câmera Cyber Shot DSC-S40. O recobrimento e geração da ortofoto foram executados pela empresa Esteio Engenharia e Aerolevantamentos S.A..

3.2.2 Imagem de satélite

A imagem utilizada neste estudo corresponde à área do Campus Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná em Curitiba. Os dados utilizados são resultados do processo de fusão, que gera bandas híbridas com resolução espacial de 70 cm no terreno.

3.2.3 Dados do Lidar

O conjunto de dados LIDAR são provenientes do sistema Optech ALTM 2025 (*Airborne LASER Terrain Mapper*). O recobrimento, disponibilizado pela Esteio – Engenharia e Aerolevantamentos S. A., estava em formato txt e dividido em duas faixas. Os dados estavam apresentados em colunas com valores E, N, H e I, sendo E e N as coordenadas Leste e Norte do sistema UTM, H representando o valor de altitude e I, valor de Intensidade.

3.2.4 Equipamento topográfico

Para a realização da segunda etapa, foi utilizada uma estação total Leica modelo TC407, com precisão angular de 5 segundos, e precisão na medida de distâncias de 5 mm + 3 ppm. A figura 24 ilustra o equipamento.



FIGURA 24 – ESTAÇÃO TOTAL LEICA TC407

FONTE: A AUTORA

3.2.5 Programas computacionais

No desenvolvimento do trabalho foram utilizados os programas ENVI, ALDPAT, EDISON, MatLab e Radiasol.

O programa ENVI (*Environment for Visualizing Images*), da empresa ITT *Visual Information Solutions*, é um programa de processamento e análise de imagens digitais de diferentes formatos e provenientes de diferentes sensores.

O ALDPAT (*Airborne LIDAR Data Processing and Analysis Tools*) é um programa que foi desenvolvido pelo *International Hurricane Research Center*, da *Florida International University*, para trabalhar com dados LIDAR. Foi utilizado para a obtenção do MDT através da filtragem de pontos de dados LIDAR, mediante aplicação de filtros morfológicos disponibilizados pelo software.

O programa EDISON (*Edge Detection and Image Segmentation*), desenvolvido pela Universidade de Rutgers (EUA), tem a função de segmentar as imagens e detectar as bordas. Neste trabalho, a segmentação foi realizada com o objetivo da extração de telhados.

O MatLab (*Matrix Laboratory*), desenvolvido pela Mathworks, é um programa iterativo voltado para o cálculo numérico. Foi utilizado, neste trabalho, para a implementação de algoritmos responsáveis por:

processamento dos dados LIDAR: geração do MDS e da imagem de intensidade; automatização de cálculos: perímetro, área, orientação e inclinação das coberturas, potencial fotovoltaico.

O Radiasol, é um programa desenvolvido pelo Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, que possibilita o cálculo da intensidade de radiação solar, sendo possível incluir determinados fatores, como a inclinação e orientação.

3.3 MÉTODO

Nessa seção, são apresentadas as etapas do processo metodológico aplicadas a este trabalho (figura 25). O método consiste em:

Para a área de estudo 1, 2 e 3:

- Processar a nuvem de pontos do Sistema LIDAR: gerar MDT, MDS, MDSn e imagem de intensidade;
- Realizar a segmentação do MDSn com o objetivo de extrair os telhados;
- Identificar as coordenadas dos cantos, calcular a área, orientação e inclinação de cada telhado a partir dos objetos segmentados representativos dos telhados;
- Calcular o potencial de geração de energia, em função da área e inclinação dos telhados;
- Identificar, pelo potencial de geração de energia calculado, as áreas economicamente e/ou tecnicamente mais viáveis para a instalação de painéis fotovoltaicos.

Para a área de estudo 3:

- Determinar área, orientação e inclinação de telhados com auxílio dos dados coletados por levantamento topográfico;
- Calcular o potencial de geração de energia para os telhados levantados.

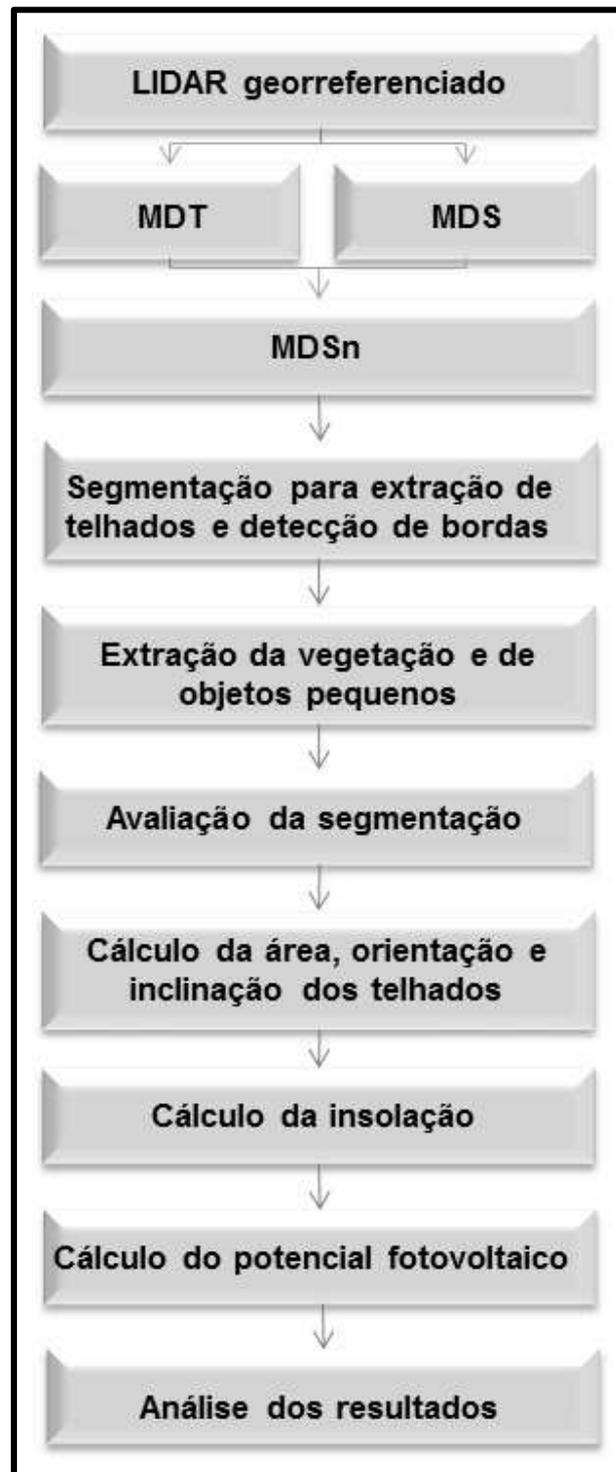


FIGURA 25 - ETAPAS DA METODOLOGIA

FONTE: A AUTORA

3.3.1 Geração do MDT, MDS e imagem de intensidade

A metodologia proposta para a geração do Modelo Digital do Terreno (MDT), Modelo Digital de Superfície (MDS) e imagem intensidade utiliza como base os dados provenientes do sistema LIDAR. Portanto, elabora-se um algoritmo em MatLab para gerar as imagens do MDS e intensidade. E, a partir do programa Aldpat, gera-se o MDT.

O arquivo de entrada consiste em leituras pontuais, com coordenadas XYZ e valores de intensidade do retorno. Estes dados foram usados para interpolar uma grade regular. O processo é descrito a seguir. Primeiro é inicializada uma grade com valores nulos cobrindo toda a área de interesse, ou seja, um retângulo com os limites iguais aos valores mínimos e máximos de X e Y. A resolução espacial da grade é fixada em função do espaçamento médio e a densidade de pontos do levantamento:

$$\text{Tam_X}=(X_{\text{max}}-X_{\text{min}})/\text{resolução}; \quad (\text{eq. 5})$$

$$\text{Tam_Y}=(Y_{\text{max}}-Y_{\text{min}})/\text{resolução}; \quad (\text{eq. 6})$$

A seguir, o arquivo de pontos é lido. Para cada ponto é calculada a coordenada na grade em termos de linha e coluna.

$$\text{Col}=\text{round} ((X-X_{\text{min}})/\text{resolução}); \quad (\text{eq. 7})$$

$$\text{Lin}=\text{round} ((Y_{\text{max}}-Y)/\text{resolução}); \quad (\text{eq. 8})$$

Se o valor da grade for nulo, então copia-se nesta coordenada o valor da coordenada Z do ponto. Se o valor não for nulo, então é verificado se o valor constante na grade é maior que o do ponto em questão. Se o ponto tiver coordenada Z menor que a grade, então este valor substitui o valor da grade, de forma que a grade armazene sempre o menor valor possível. A justificativa para esta regra é que se deseja uma grade com os last pulse, ou menor valor, que seria correspondente à superfície do terreno ou telhados, e não à vegetação ou fios.

O resultado deste processo é uma grade com falhas, pois alguns pontos não são cobertos pelo levantamento. Para preencher estes pontos, aplica-se um filtro

que detecta a presença de valores nulos na grade e adota o menor valor não nulo da vizinhança 3x3 para substituir esta falha.

Após a filtragem, sobram algumas áreas, resultados da oclusão, que podem ter valores nulos. Estas áreas podem ser preenchidas repetindo o processo até que não existam valores nulos na área de interesse.

3.3.2 Geração do MDSn

Para analisar os objetos na imagem é necessário separar objetos do terreno. Existem diferentes alternativas para automatizar este processo. Algumas delas são descritas em Sithole e Vosselman (2003). Como a intensão neste estudo não é avaliar a eficiência destes métodos e a área sendo pequena, o modelo digital do terreno é obtido digitalizando pontos na tela. Este processo consiste em identificar pontos do terreno na grade por análise visual. A tarefa é fácil, pois se dispõe de pontos nas ruas e pátios da área urbana. Com estes pontos, interpola-se um MDT grosseiro. O modelo não é uma descrição adequada do terreno, mas serve para separar os pontos elevados.

A seguir, o efeito do terreno nas cotas é eliminado, subtraindo o modelo digital do terreno do modelo digital de superfície, resultando no que é conhecido como o modelo digital de superfície normalizado (MDSn)

$$\text{MDSn} = \text{MDS} - \text{MDT} \quad (\text{eq. 9})$$

A nova grade, que contém os objetos acima do terreno, é binarizada na sequência, com o objetivo de separar pequenas elevações ou falhas no cálculo das elevações. Com isto, apenas objetos com cota acima de 3m foram separados, gerando uma máscara binária. A máscara foi cruzada com a grade do MDSn para separar os objetos mais elevados, supostamente árvores ou construções.

3.3.3 Recorte

Como o levantamento foi feito seguindo uma linha inclinada em relação ao sistema norte-leste, foram obtidos recortes para o processamento. As grades foram recortadas, para evitar regiões com pouco ou sem nenhum dado e, depois, salvas no formato .TIF.

3.3.4 Segmentação dos telhados e detecção de bordas

A imagem contendo os objetos elevados ainda apresenta objetos como árvores, que não são telhados e devem ser separados. Para isto, utiliza-se o algoritmo de segmentação *mean-shift* (COMANICIU E MEER, 2002) e a análise de textura.

O segmentador usado é aquele disponível no software EDISON, que é baseado na segmentação *mean-shift* de deslocamento de médias espectrais, onde cada aglomerado delinea uma região homogênea na imagem, além de detectar as bordas. De acordo com Machado (2006), o algoritmo de deslocamento pela média é uma técnica robusta de classificação de agrupamentos que não exige conhecimento a priori sobre a quantidade de grupos, nem restringe o formato destes agrupamentos. Trata-se de um método iterativo que estima a moda (regiões mais densas) de distribuições multivariadas obtidas no espaço de atributos. A quantidade de agrupamentos é obtida automaticamente pela descoberta dos centros destas modas.

Para Georgescu *et al.* (2003), a operação mais penosa deste algoritmo é a dos vizinhos mais próximos de um ponto no espaço de atributos, sendo este problema denominado de pesquisa de elementos em espaço n-dimensional.

Para a obtenção de um bom resultado no processo de extração de edificações, a etapa da segmentação é de fundamental importância. O programa utilizado, segundo Machado (2006) lê imagens, detecta bordas e realiza segmentação, gerando imagens de saída, com tempo de processamento muito bom em relação a outros programas. As imagens de saída são em forma de contornos branco e preto, de regiões com cores semelhantes.

O algoritmo de deslocamento pela média é bem simples, mas para melhorar sua eficiência são necessários cuidados, estando sujeito à perda de tempo no processamento, além de não obter resultados adequados. Portanto, na etapa de segmentação é fundamental a utilização de parâmetros corretos para obter um bom resultado no processo de extração de edificações. O parâmetro de escala está associado à vizinhança que é analisada durante o agrupamento, sendo sete pixels escolhidos para esta análise. Outro parâmetro a ser considerado, é o de cor, que representa a tolerância aceita em termos de valores digitais para considerar dois pixels similares em termos de valor digital, sendo este fixado em cinco. E a região mínima para ser definida em uma única área é de 50 pixels.

Ainda segundo Machado (2006), todas as regiões identificadas nesta etapa são polígonos, ou seja, apresentam contornos fechados.

O algoritmo considera o espaço de valores digitais como uma função de densidade de probabilidade empírica. Se houver regiões uniformes dentro da imagem, seus valores iriam formar agrupamentos no espaço de valores e estes agrupamentos corresponderiam ao local do máximo da função densidade de probabilidade. O algoritmo visa então detectar tais máximos em um processo iterativo (CENTENO *et al.*, 2012).

Uma vizinhança é definida, inicialmente fixada pelas coordenadas do pixel em análise (centro) e um raio de busca. A hipótese a ser verificada é se o centro da região é o máximo local. Para isto, o algoritmo calcula o centroide do grupo e o compara ao centro. Se eles forem diferentes, o centro é movido para o centróide e o processo repetido até que coincidam. Quando os pontos coincidem, o pixel em questão recebe o valor do centroide, o que torna possível agrupar os pixels similares na vizinhança.

3.3.5 Análise de segmentos para extrair a vegetação e objetos pequenos

A segmentação separa os objetos com valores similares em grupos com fronteiras bem definidas. O seguinte passo é analisar estes agrupamentos. Como o valor da altura não é um parâmetro válido para separar árvores de telhados, optou-

se por analisar a variância local, a textura dos segmentos, segundo é apresentado em CENTENO *et al.* (2009).

Calcula-se, primeiramente, os componentes conexos para obter a quantidade de segmentos. Estima-se que a área mínima de uma edificação seja de 50 m². Com isso, os segmentos de pequeno porte, são eliminados.

As árvores de grande porte ainda se mantiveram na imagem, mas, para isso, é necessário ser feito uma análise de textura que consiste em calcular a variância local em uma janela de 3x3 pixels. Depois calcula-se para cada segmento o valor médio deste parâmetro. Assim, cada segmento tem um descritor da uniformidade da sua superfície, e valores altos são associados às árvores por serem superfícies rugosas. Adotando-se um limiar de textura os segmentos com grande variação, são eliminados e os que possuem uniformidade são mantidos.

3.3.6 Cálculo de área, inclinação e orientação de telhados

Finalmente, os descritores da geometria dos telhados são calculados para os segmentos resultantes. Numa fase preliminar, as áreas retangulares foram separadas, pois prédios quadrados ou irregulares não podem ser incluídas nesta análise. Para isso, analisou-se a forma dos segmentos, considerando a deficiência convexa e sua compacidade, utilizou-se o coeficiente de compacidade de Gravelius, definido por:

$$Kc = 0,28 \times \left(\frac{P}{\sqrt{A}} \right) \quad (\text{eq. 10})$$

Sendo:

Kc = índice de compacidade;

P = perímetro do segmento (m);

A = área do segmento (m²).

Neste coeficiente, procura-se relacionar a forma do segmento com a de um círculo com a mesma área. O coeficiente é a relação entre o perímetro do segmento “P” e o perímetro de um círculo “Pc” de igual área. O índice de compacidade é um

número adimensional, no mínimo será igual à unidade 1 correspondendo, nesse caso, a uma forma circular. Quanto mais irregular for a forma, tanto maior será o respectivo coeficiente de compacidade. Neste estudo, adotou-se um limiar de compacidade de 1,2 para selecionar apenas prédios alongados.

A deficiência Convexa descreve a relação entre a área da região e a área do menor polígono convexo que encerra a região (fecho convexo). Esta propriedade descreve a suavidade dos contornos, sendo que quanto mais suave a região, mais parecido será sua área com a do polígono convexo envolvente. Como pode ser visto na figura 26, um segmento (figura 26.a) exemplificando os pixels de uma construção, formam um polígono de contornos que podem ser irregulares. Mostra-se na figura 26.b o fecho convexo deste segmento, representado pela linha vermelha. Finalmente, a deficiência convexa é a diferença entre estas duas figuras, representada pela área cinza.

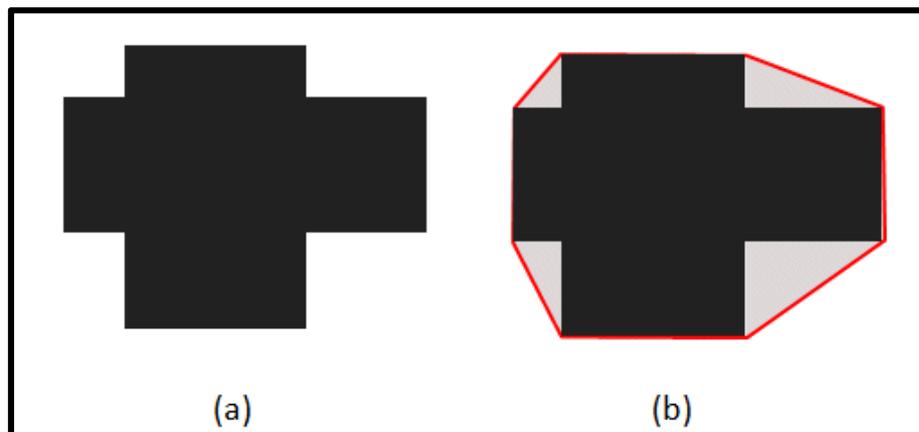


FIGURA 26 - EXEMPLO DE DEFICIÊNCIA CONVEXA. A) SEGMENTO ORIGINAL. B) SEGMENTO COM O FECHO CONVEXO EM LINHA VERMELHA

FONTE: A AUTORA

Para a estimativa da orientação do telhado foi aplicada a análise de componentes principais às coordenadas XY de cada segmento. A transformação das componentes principais permite obter a direção dos eixos principais da nuvem de pontos. Sendo que os telhados apresentam uma forma regular, a primeira componente corresponde à direção de maior espalhamento dos pontos, ou seja, o comprimento do telhado e a segunda componente corresponde à largura.

Como descrevem Andrade e Centeno (2003), no cálculo da transformação por componentes principais, cada pixel de uma região é tratado como um vetor bidimensional, cujas componentes correspondem a suas coordenadas linha/coluna. Do conjunto de todos os pixels da região é então calculado o vetor médio e a matriz variância covariância do conjunto (região). A partir da matriz variância-covariância podem ser estimados os dois autovalores e, seus respectivos, autovetores. Os autovetores estimam a direção dos dois eixos do conjunto de pontos e os autovalores o comprimento relativo destes eixos (variância nestas direções).

Na figura 27, há uma ilustração que exemplifica este procedimento. A nuvem de pontos, marcada como pequenos círculos, compõe um segmento. Cada ponto possui as coordenadas linha/coluna (Y,X) e a dispersão do conjunto pode ser calculada pela matriz de variância-covariância (MVC).

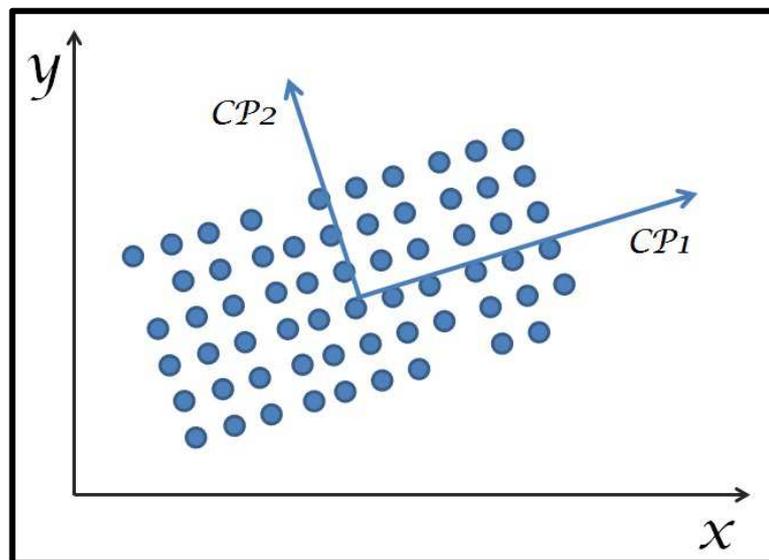


FIGURA 27 - EXEMPLO DE AUTOVETORES DE UMA NUVEM DE PONTOS

FONTE: A AUTORA

Os autovalores da matriz de MVC são os escalares λ que satisfazem a equação característica.

$$\det(MVC - \lambda I) = 0 \quad (\text{eq. 11})$$

Sendo:

I = matriz identidade.

Para cada autovalor é possível calcular o respectivo autovetor v , substituindo o autovalor na equação:

$$(MVC - \lambda I) x v = 0 \quad (\text{eq. 12})$$

O segundo autovetor descreve a direção para o qual um telhado alongado apontaria, ou seja, a variável desejada para calcular a insolação.

Como telhados orientados no sentido norte-sul não oferecem potencial para a geração de energia solar, devido à baixa insolação, apenas os telhados com face norte, aceitando uma faixa de variação de 45 graus ao leste ou ao oeste foi considerada para este estudo.

Outro parâmetro relevante é a inclinação do telhado, para isto, é necessário identificar os valores máximos e mínimos na região, assumindo que o máximo se encontra na cumeeira do telhado e o mínimo na sua borda. A inclinação pode então ser calculada a partir da diferença destas duas alturas e a largura de metade do telhado, assumindo que o telhado tem duas águas. Esta hipótese pode não se verificar em todos os prédios, mas foi adotada por motivos de simplificação.

Para a obtenção da verdade de campo, a inclinação, orientação e área também foram calculadas manualmente. Conforme a figura 28, seleciona-se os pontos das bordas das edificações, o critério para a coleta da coordenada do primeiro ponto é o que possui maior coordenada em N, e para o segundo ponto é a menor coordenada em N; para o terceiro ponto a maior coordenada em E e para o quarto ponto a menor coordenada em E. Quando há mais de um ponto com o valor máximo de E, o ponto com maior e menor valor em E é utilizado.

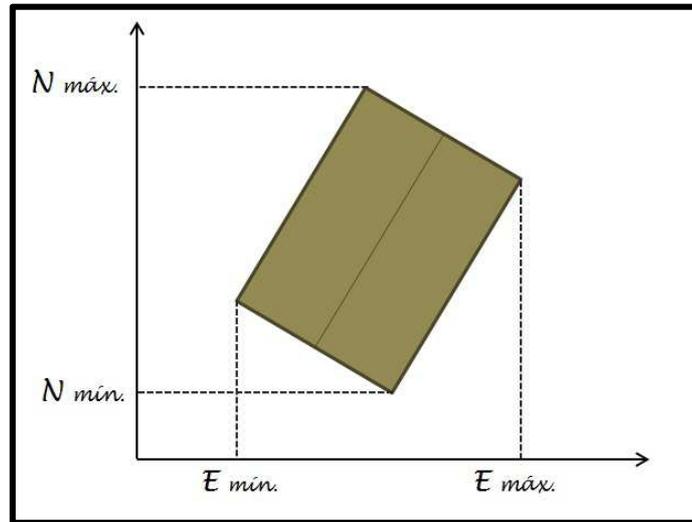


FIGURA 28 – COORDENADAS DOS CANTOS DAS EDIFICAÇÕES

FONTE: A AUTORA

Para cada ponto que define os cantos das edificações, tem-se os valores de E, N e h. Nos pontos que tiverem altitudes diferentes em uma mesma aresta, são definidos pelo valor de maior e de menor altitude. Conforme a figura 29, os pontos com maior altitude são interligados, pois correspondem à cumeeira do telhado (em vermelho) e divide as águas dos telhados.

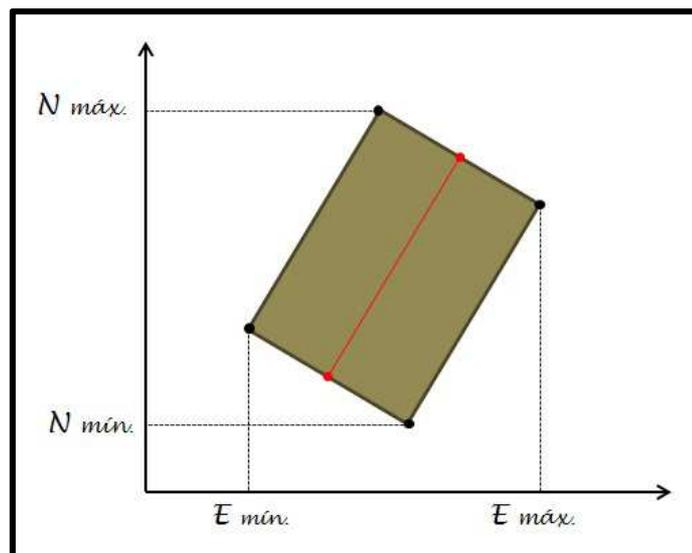


FIGURA 29 – CUMEEIRA DO TELHADO

FONTE: A AUTORA

As bordas que possuem a mesma altitude ao longo das arestas servirão de base para a definição da orientação da água do telhado, que é dada de 0° a 360°, sempre partindo do ângulo voltado para o norte para o sentido leste, conforme a figura 30.

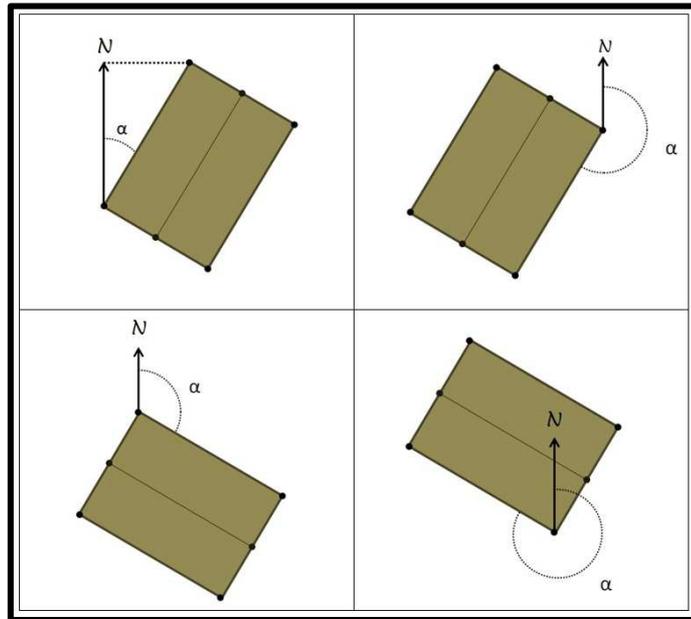


FIGURA 30 – ORIENTAÇÃO DAS ÁGUAS DOS TELHADOS

FONTE: A AUTORA

Para definir a inclinação, seleciona-se o ponto central da cumeeira do telhado e o ponto central da aresta mais baixa pertencente à mesma água do telhado.

No cálculo da área, visualizado na figura 31, utiliza-se primeiramente o teorema de Pitágoras, descrito pela equação 13.

$$a^2 = b^2 + c^2 \quad (\text{eq. 13})$$

Sendo:

a = aresta da face inclinada do telhado;

b = distância entre um ponto central aresta da borda e um ponto central da aresta que divide as águas do telhado;

c = diferença de altura entre o ponto mais alto e mais baixo do telhado.

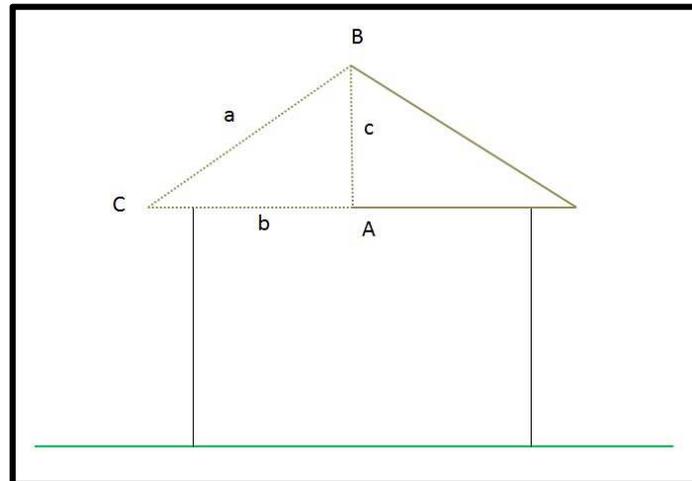


FIGURA 31 – DEFINIÇÃO DE ÁREA

FONTE: A AUTORA

Depois de obtido o valor da aresta a , multiplica-se pelo resultado da soma da aresta de menor altitude e pela cumeeira divididas por dois.

3.3.7 Áreas viáveis

A partir da orientação, inclinação e área é calculado o potencial fotovoltaico para a análise de viabilidade dos cálculos feitos à mão.

Primeiramente, é calculada a duração do dia para a cidade de Curitiba, usando-se a declinação do Sol no inverno ($23,5^\circ$) e no verão ($-23,5^\circ$), através das equações 14 e 15.

$$H_n = \cos^{-1}[-\tan(\varphi) \times \tan(\delta)] \quad (\text{eq. 14})$$

$$H_0 = \cos^{-1}[\tan(\varphi) \times \tan(\delta)] \quad (\text{eq. 15})$$

Sendo:

H_n = ângulo horário no nascer do Sol;

H_0 = ângulo horário no pôr do Sol;

φ = latitude;

δ = declinação do Sol.

Então, a duração do dia é dada pela equação 16.

$$D = |\overline{H_n}| - |\overline{H_0}| \quad (\text{eq. 16})$$

Sendo:

D = duração do dia;

A seguir, o ângulo M da face escolhida do telhado deverá ser calculado, através da seguinte fórmula descrita pela equação 17.

$$M = \tan^{-1} \left(\frac{\tan(Az)}{\sin(\varphi)} \right) \quad (\text{eq. 17})$$

Sendo:

Az = azimute do telhado;

φ = latitude.

A seguir serão usados os valores da declinação do Sol no inverno e no verão (para a cidade de Curitiba). O ângulo tocante ao Sol no inverno e no verão é calculado utilizando os valores de declinação, através da equação 18:

$$H_t = \cos^{-1} \left(\frac{\cos(M) \times \tan(\delta)}{\tan(\varphi)} \right) \quad (\text{eq. 18})$$

Sendo:

H_t = ângulo tocante ao Sol;

M = ângulo auxiliar;

δ = declinação do Sol na estação;

φ = latitude.

A partir dos dados obtidos, a insolação da face do telhado será calculada, pela equação 19:

$$I_s = H_0 + H_t \quad (\text{eq. 19})$$

Sendo:

I_s = insolação;

H_0 = ângulo horário do pôr do Sol.

Então, para calcular o potencial fotovoltaico, o valor utilizado foi 5000Wh/m², obtido do Atlas de irradiação Solar do Brasil para a região Sul. O valor aproximado para a geração de energia em um dia é dado pela equação 20:

$$P_f = 5000 \times I_s \quad (\text{eq. 20})$$

Sendo:

P_f = potencial fotovoltaico (Wh/m² dia);

I_s = insolação.

Para a obtenção de um cálculo preciso, com a equação 21, calcula-se a potência instalada no sistema fotovoltaico, considerando o silício policristalino (p-Si) como material utilizado no módulo do painel fotovoltaico.

$$P_{cc} = A_{disp} \times \frac{E_{ff}}{100} \quad (\text{eq. 21})$$

Sendo:

P_{cc} = Potência instalada no sistema (kWp)

A_{disp} = Área de cobertura disponível (m²)

E_{ff} = eficiência do módulo (%)

Através da equação 22, calcula-se a quantidade de energia gerada pelo sistema porém esta é uma estimativa simplificada. Sendo assim, fatores como: diferença de temperatura, sombras, acoplamento elétrico, poeira, perdas por deterioração, não foram considerados.

$$E = n_{el} \times P_{cc} \times G_{POA} \quad (\text{eq. 22})$$

Sendo:

E = potencial fotovoltaico gerada pelo sistema (kWh/dia);

N_{el} = eficiência do sistema inversor (com valor tipicamente de 90%);

P_{cc} = Potência instalada no sistema (kWp);

G_{POA} = quantidade de radiação incidente no plano do painel (kWh/m²/dia).

3.3.8 Teste e validação

Para avaliar o sucesso do método proposto, os resultados obtidos serão confrontados com medições obtidas pelos métodos digitais, manuais e topográfico (medido em parte da área três).

Finalmente, os valores do potencial fotovoltaico destas edificações obtidas serão avaliados com base nestes outros métodos e será obtida uma estimativa da qualidade do resultado, para verificar em que situações as estimativas pelo método ALS são boas ou quando elas falham quando comparadas entre si.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, serão apresentados os resultados obtidos em cada etapa proposta na metodologia, que foi aplicada em todas as áreas estudadas.

4.1 RESULTADOS

Como descrito anteriormente, as três áreas de estudos escolhidas estão na cidade de Curitiba, sendo que a área 1, representada pela figura 32, é caracterizada por edificações com bordas bem definidas e isoladas, e árvores nos arredores das edificações.

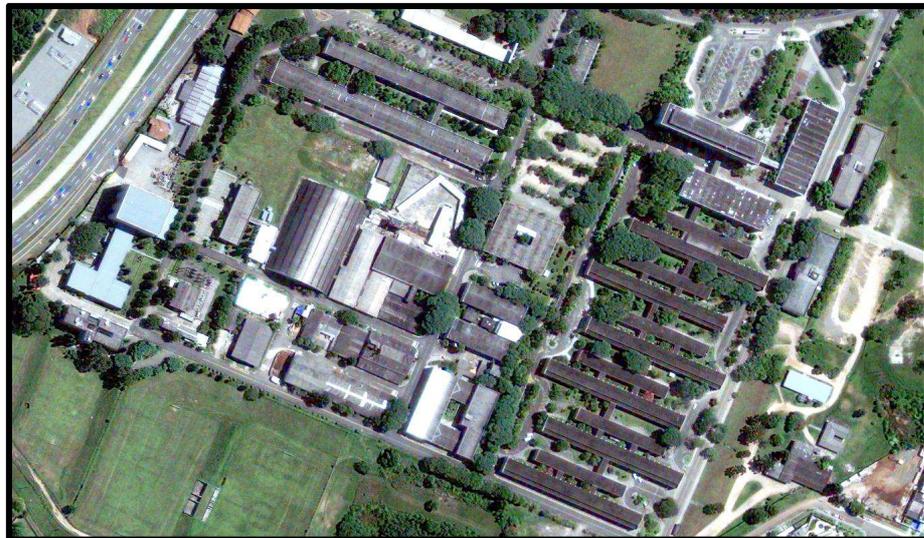


FIGURA 32 – ÁREA DE ESTUDO 1

FONTE: A AUTORA

As áreas 2 e 3 (figuras 33 e 34, respectivamente) são caracterizadas por um ambiente tipicamente urbano, composto predominantemente por edificações baixas, árvores isoladas e um pouco de vegetação.



FIGURA 33 – ÁREA DE ESTUDO 2

FONTE: A AUTORA



FIGURA 34 – ÁREA DE ESTUDO 3

FONTE: A AUTORA

4.1.1 MDT, MDS e MDSn

Como proposto, foram gerados o MDT, visualizado nas figuras 35, 36 e 37, e o MDS das áreas propostas, a partir dos dados LIDAR.

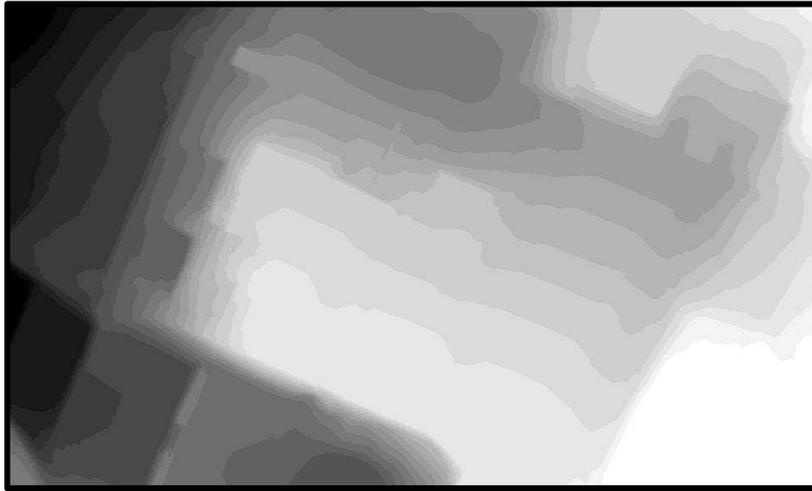


FIGURA 35 – MDT DA ÁREA 1

FONTE: A AUTORA

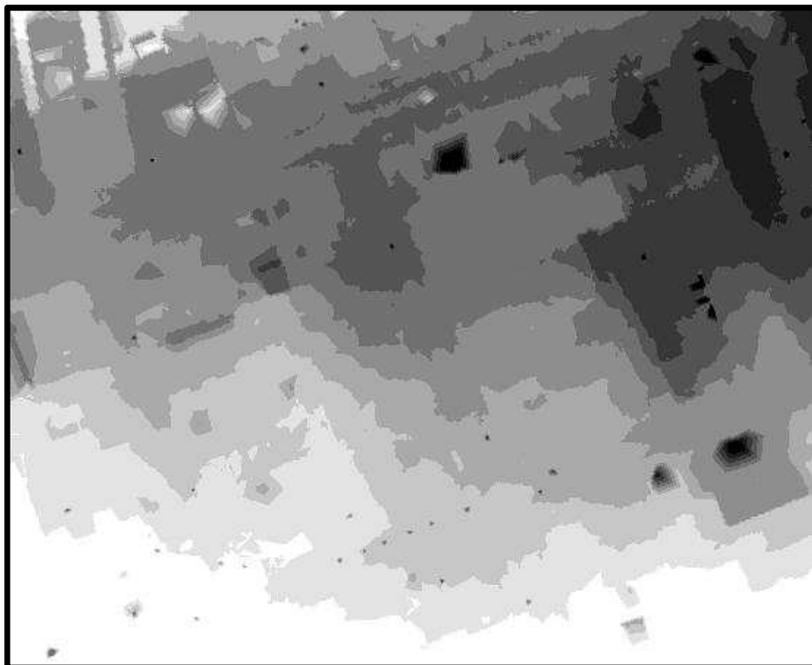


FIGURA 36 – MDT DA ÁREA 2

FONTE: A AUTORA

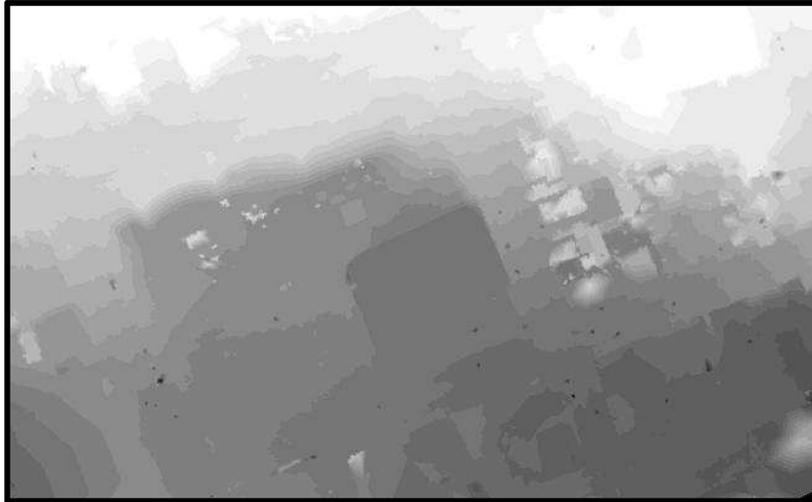


FIGURA 37 – MDT DA ÁREA 3

FONTE: A AUTORA

Para a imagem MDS, foi feito preenchimento dos pixels que estavam com valores iguais a zero utilizando filtros morfológicos. Nos lugares em que havia heterogeneidade com seus vizinhos, os valores continuaram iguais a zero. Foi necessário então adotar um novo procedimento para preenchimento dos mesmos. Implementou-se o filtro morfológico de fechamento (dilatação seguida de erosão), tomando cuidado para que as áreas de edificações não se expandissem e para que não houvesse o preenchimento de pixels com valores interpolados, pois poderiam prejudicar o resultado de delimitação das bordas dos telhados. Os resultados podem ser vistos nas figuras 38, 39 e 40.

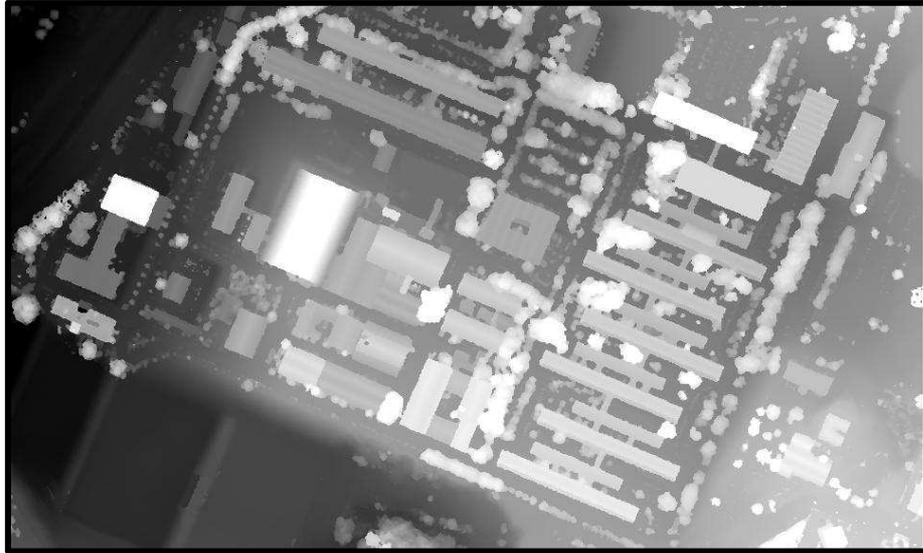


FIGURA 38 – MDS DA ÁREA 1

FONTE: A AUTORA

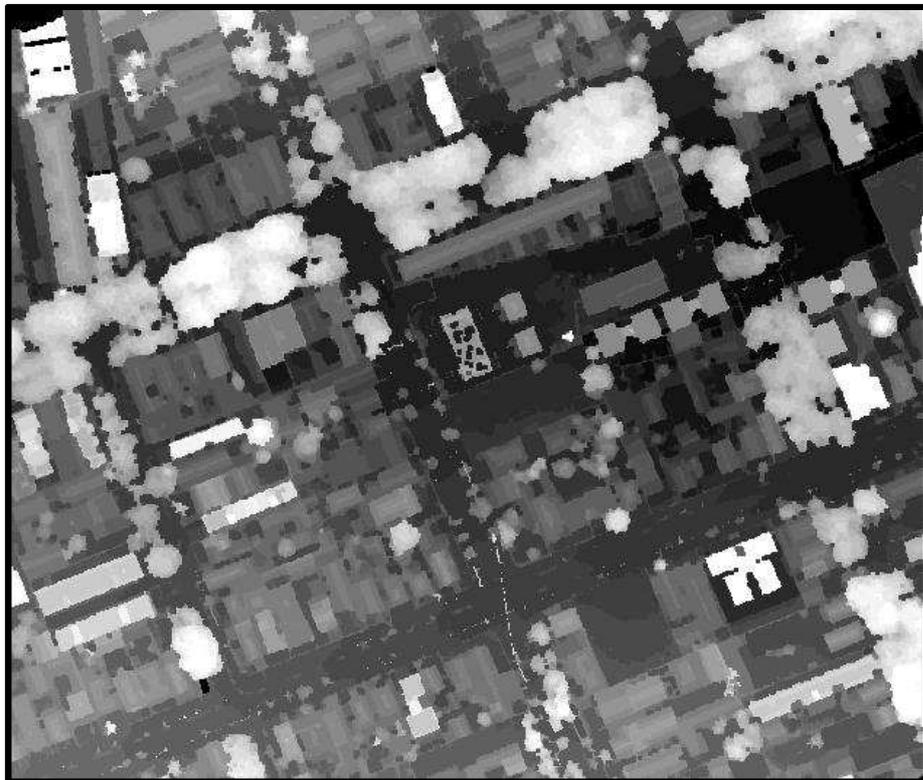


FIGURA 39 – MDS DA ÁREA 2

FONTE: A AUTORA

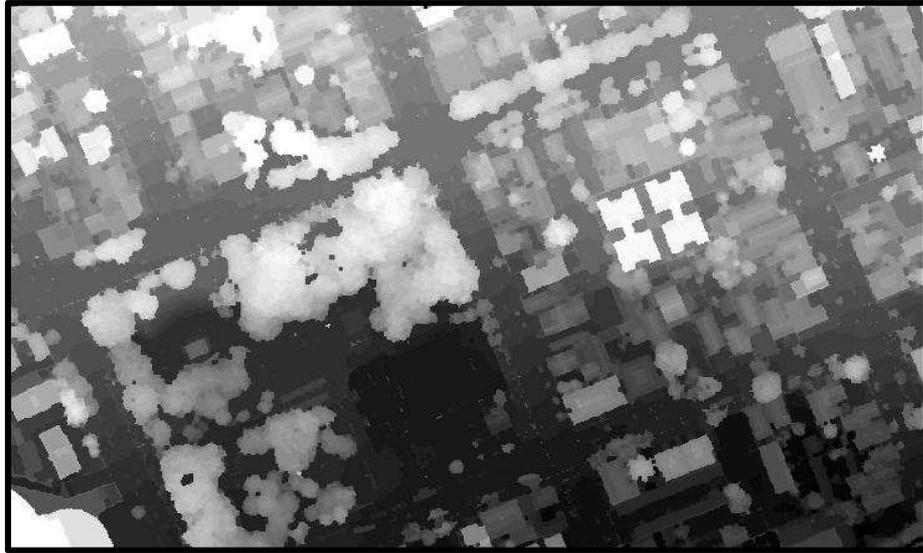


FIGURA 40 – MDS DA ÁREA 3

FONTE: A AUTORA

Para as áreas propostas foram realizadas as subtrações da grade do MDS pelo MDT, obtendo-se o MDSn. As imagens resultantes podem ser visualizadas nas figuras 41, 42 e 43 em escala de cinza, sendo que os pontos mais altos da superfície estão representados pelos valores mais claros e os pontos mais baixos representam os valores mais escuros. Nota-se a presença de áreas com vegetação, cobrindo parte da malha viária e prédios com diversas formas e alturas.

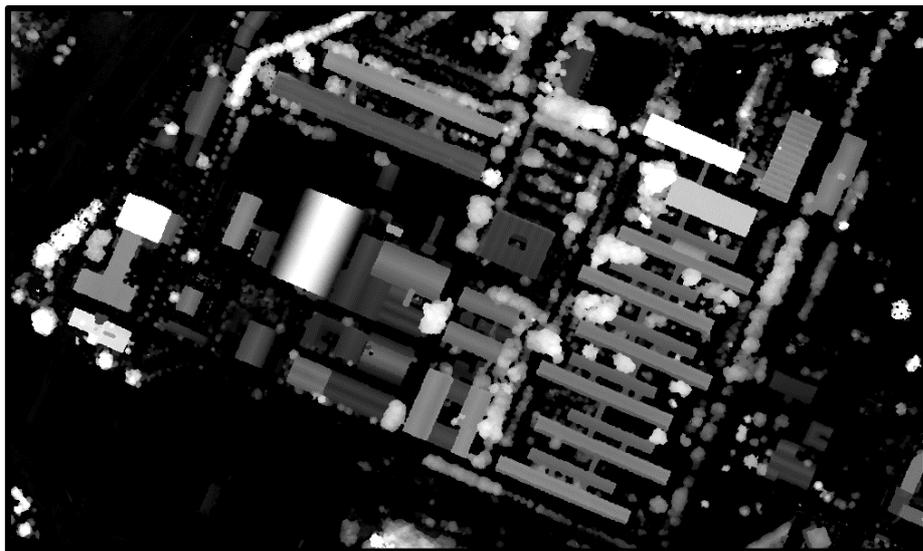


FIGURA 41 – MDSN DA ÁREA 1

FONTE: A AUTORA



FIGURA 42 – MDSN DA ÁREA 2

FONTE: A AUTORA

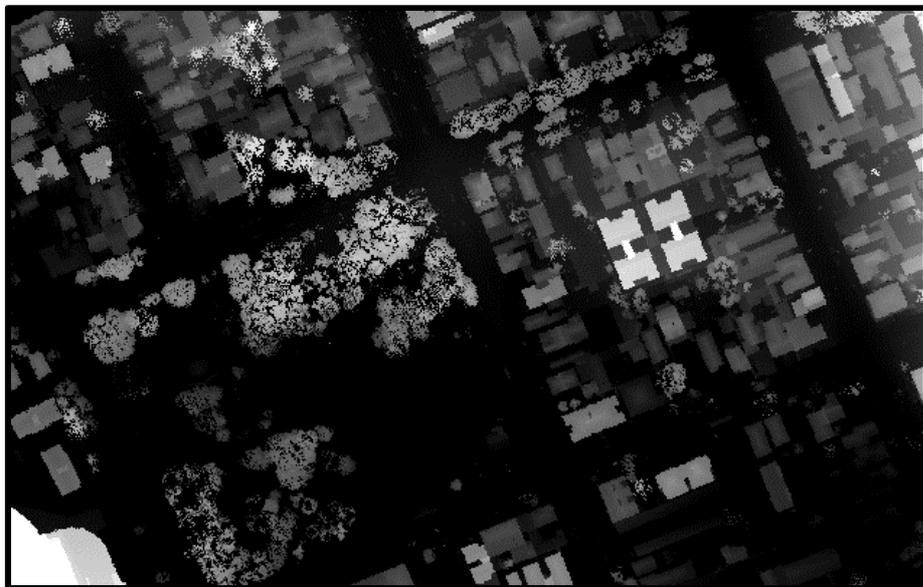


FIGURA 43 – MDSN DA ÁREA 3

FONTE: A AUTORA

4.1.2 Segmentação

Na etapa da segmentação utilizando o método *mean-shift*, são utilizadas as imagens dos MDSns. Os parâmetros adotados que controlam o crescimento de regiões foram definidos por: 7 pixels para o parâmetro de escala e 6 para o parâmetro de cor. Para as regiões mínimas foram adotados 20 pixels. As figuras 44, 45 e 46 mostram as imagens segmentadas.

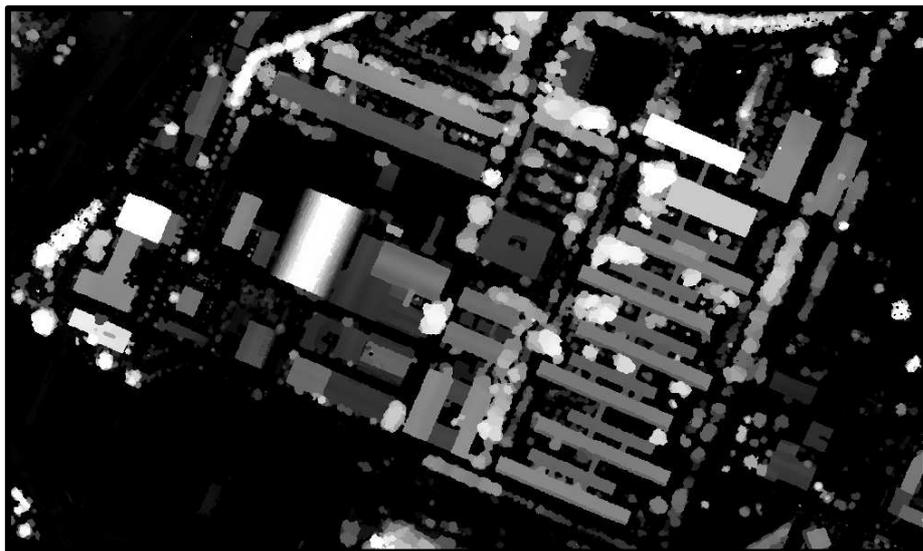


FIGURA 44 – IMAGEM SEGMENTADA DA ÁREA 1

FONTE: A AUTORA

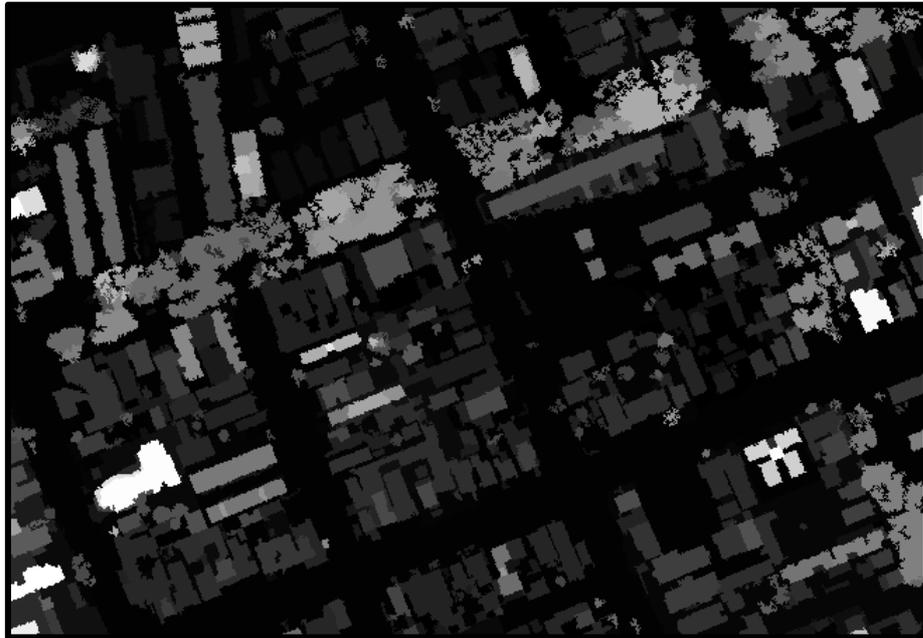


FIGURA 45 – IMAGEM SEGMENTADA DA ÁREA 2

FONTE: A AUTORA

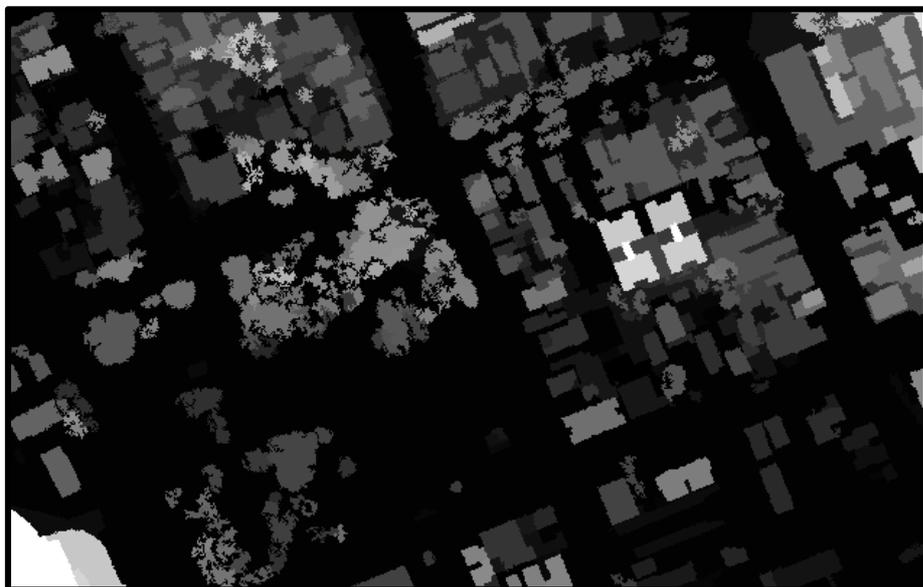


FIGURA 46 – IMAGEM SEGMENTADA DA ÁREA 3

FONTE: A AUTORA

As bordas dos segmentos aparecem em preto. Nota-se que existem segmentos muito irregulares, correspondentes à vegetação e que as bordas dos prédios não são linhas retas, pois existe o efeito da discretização na grade regular e

a diferença decorrente do próprio método de coleta de dados ALS que nem sempre atinge as bordas dos objetos. Os resultados das bordas são representados pelas figuras 47, 48 e 49.

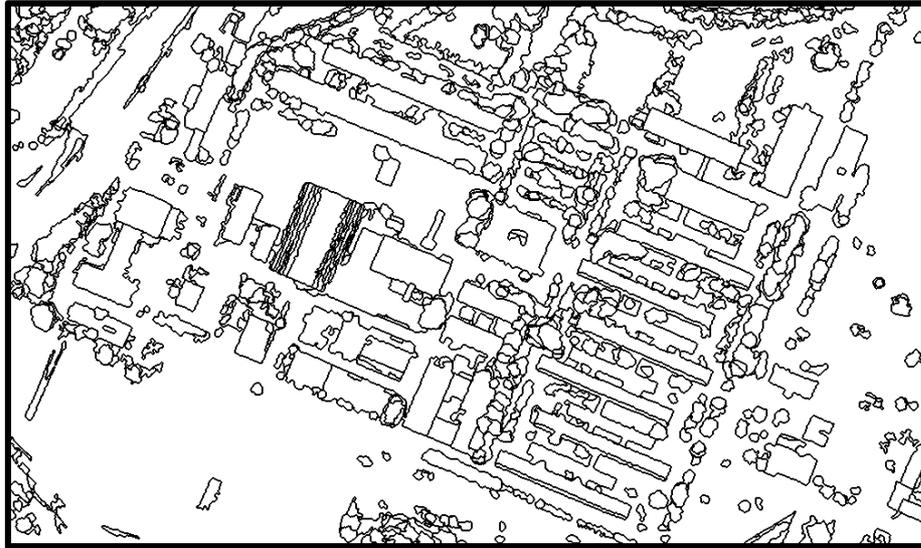


FIGURA 47 - SEGMENTAÇÃO DA ÁREA 1

FONTE: A AUTORA



FIGURA 48 - SEGMENTAÇÃO DA ÁREA 2

FONTE: A AUTORA



FIGURA 49 - SEGMENTAÇÃO DA ÁREA 3

FONTE: A AUTORA

As imagens segmentadas foram, então, submetidas a processos de abertura, aplicando a morfologia matemática. Os resultados, mostrados nas figuras 50, 51 e 52, são compostos por áreas mais regulares, e pequenos segmentos são eliminados. Porém, as áreas de vegetação permanecem nas imagens.

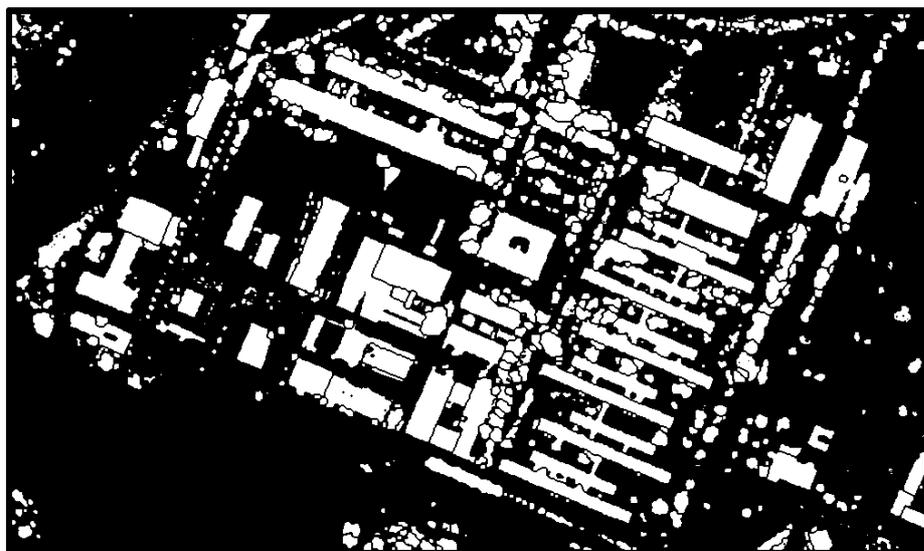


FIGURA 50 - IMAGEM DE OBJETOS ELEVADOS APÓS A SUA VIZIÇÃO PELO OPERADOR DE MORFOLOGIA MATEMÁTICA DE ABERTURA PARA A ÁREA 1

FONTE: A AUTORA

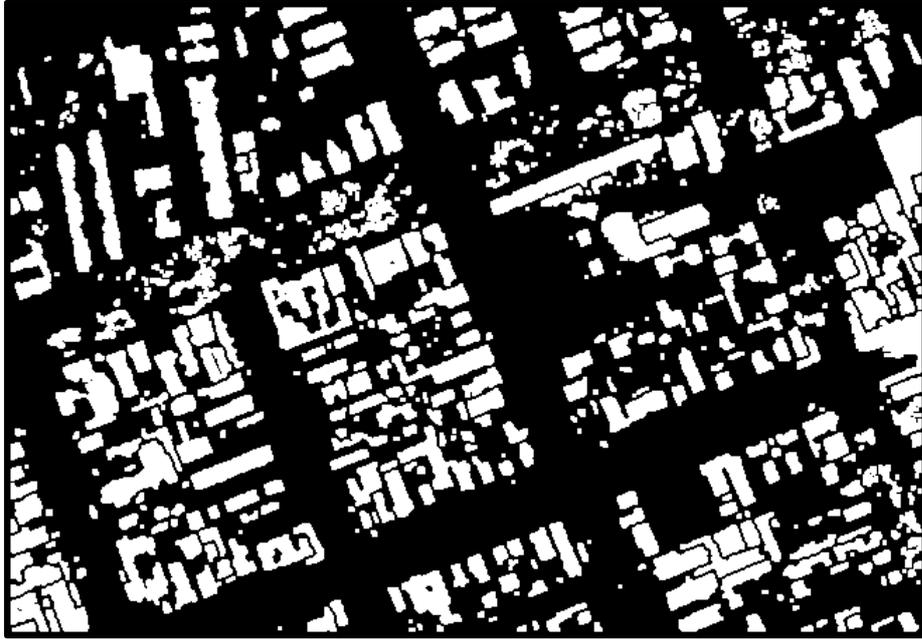


FIGURA 51 - IMAGEM DE OBJETOS ELEVADOS APÓS A SUAVIZAÇÃO PELO OPERADOR DE MORFOLOGIA MATEMÁTICA DE ABERTURA PARA A ÁREA 2

FONTE: A AUTORA

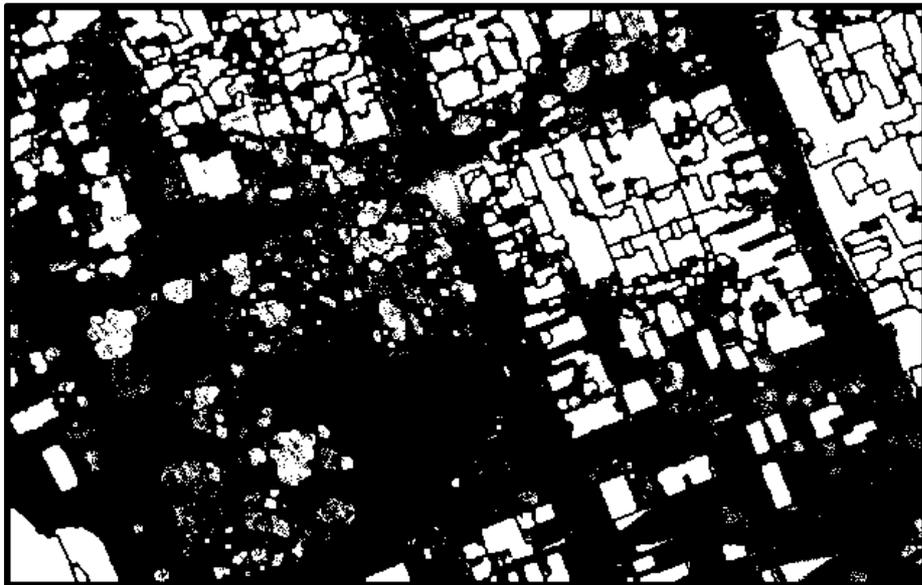


FIGURA 52 - IMAGEM DE OBJETOS ELEVADOS APÓS A SUAVIZAÇÃO PELO OPERADOR DE MORFOLOGIA MATEMÁTICA DE ABERTURA PARA A ÁREA 3

FONTE: A AUTORA

As imagens binárias mostradas nas figuras 50, 51 e 52 foram utilizadas para selecionar nas grades do MDSn os objetos elevados de interesse. Estas novas grades foram analisadas em relação à textura local. Para cada pixel, o valor da variância foi calculado, considerando uma vizinhança 3x3. Os valores resultantes foram armazenados em uma grade, como mostrado na figura 53 para a área 2. Neste caso, variâncias maiores estão associadas às tonalidades mais escuras.



FIGURA 53 - GRADE DE TEXTURA PARA A ÁREA DE TESTE 2

FONTE: A AUTORA

Aplicando-se o limiar da variância, as áreas de vegetação podem ser eliminadas, pois elas apresentam as maiores variações locais. Para isto, foi calculado o valor médio da variância para cada segmento. Os resultados das áreas com menores variações são mostrados nas figuras 54, 55 e 56.

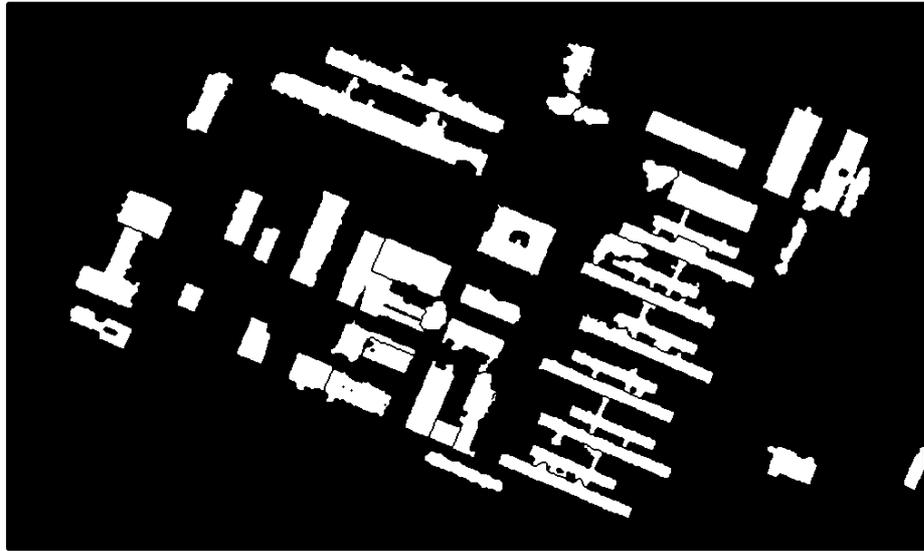


FIGURA 54 - SEGMENTAÇÃO DE ÁREAS COM POUCA VARIAÇÃO SUPERFICIAL OU BAIXA TEXTURA – ÁREA 1

FONTE: A AUTORA

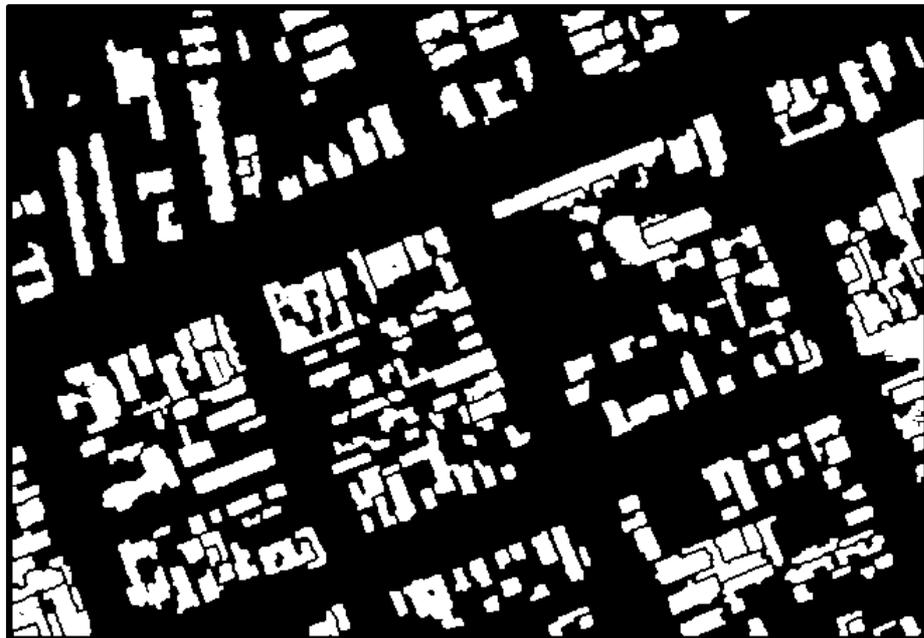


FIGURA 55 - SEGMENTAÇÃO DE ÁREAS COM POUCA VARIAÇÃO SUPERFICIAL OU BAIXA TEXTURA – ÁREA 2

FONTE: A AUTORA

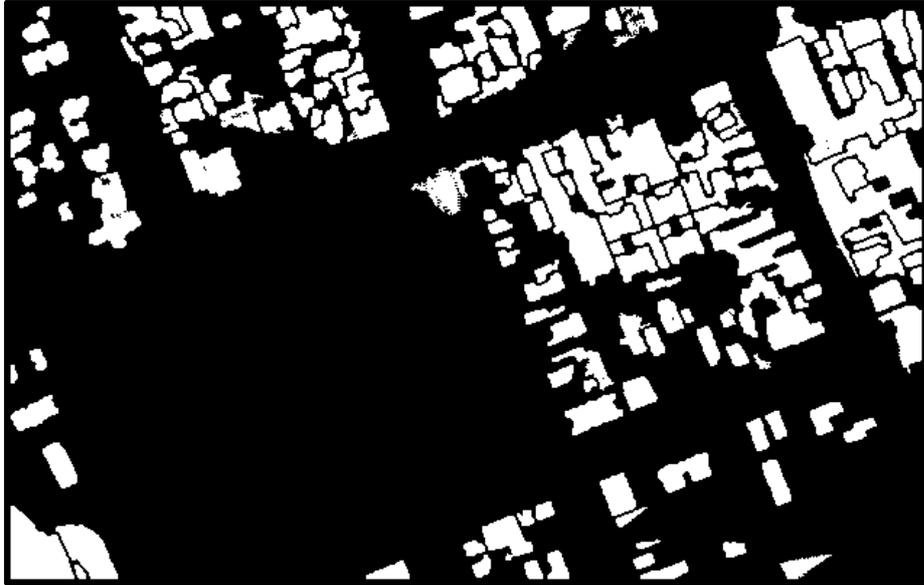


FIGURA 56 - SEGMENTAÇÃO DE ÁREAS COM POUCA VARIAÇÃO SUPERFICIAL OU BAIXA TEXTURA – ÁREA 3

FONTE: A AUTORA

Com a aplicação desta máscara ao modelo digital de superfície normalizado (MDSn), foi obtida uma estimativa dos prédios nas áreas de estudo, como são mostrados nas figuras 57, 58 e 59.

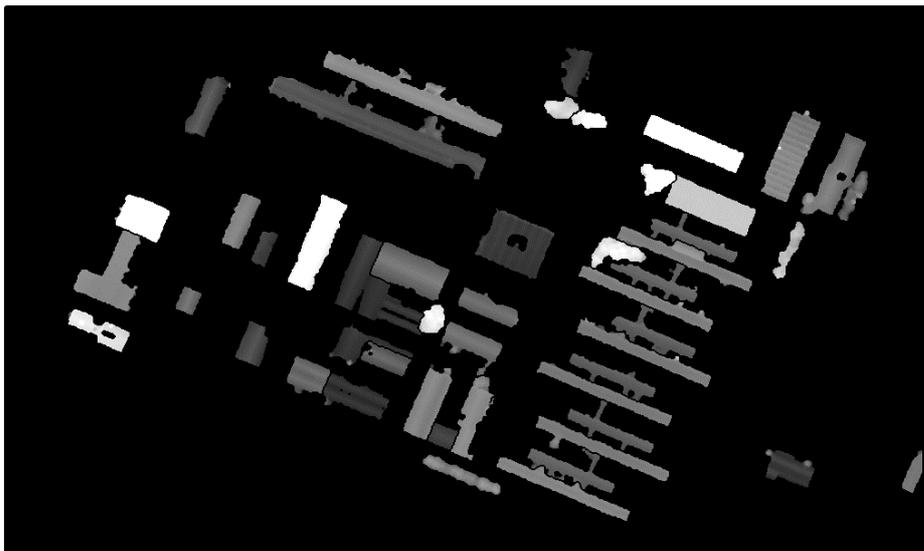


FIGURA 57 - PRÉDIOS SEGMENTADOS NA ÁREA 1

FONTE: A AUTORA

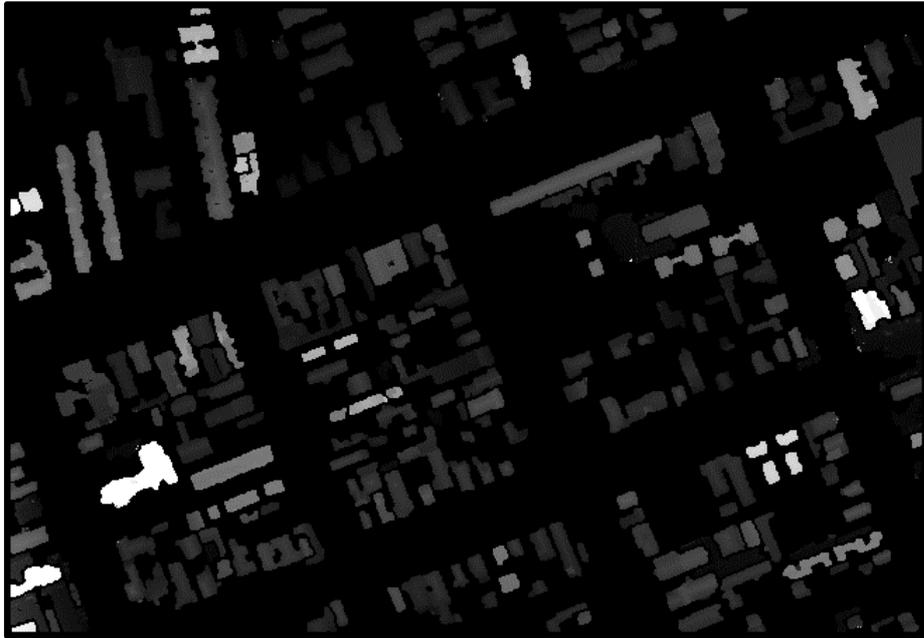


FIGURA 58 - PRÉDIOS SEGMENTADOS NA ÁREA 2

FONTE: A AUTORA

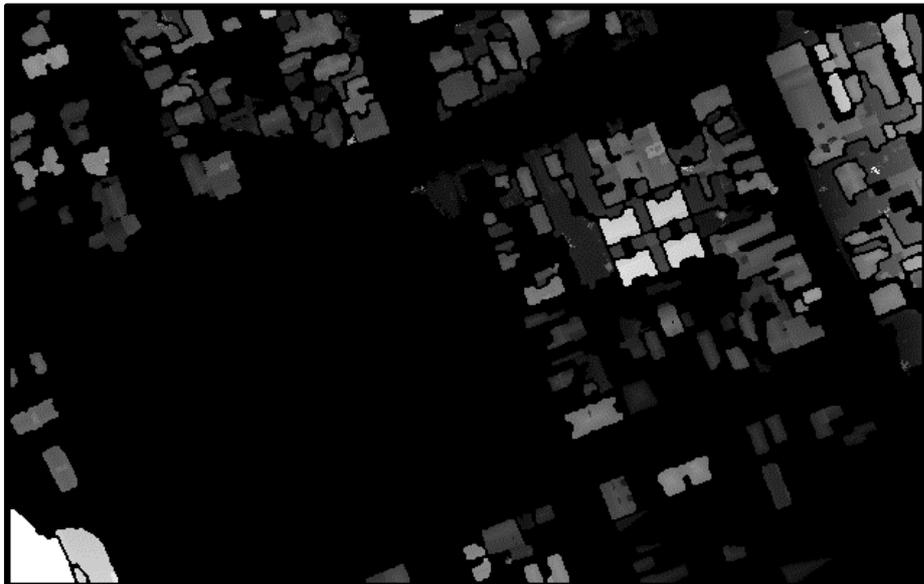


FIGURA 59 - PRÉDIOS SEGMENTADOS NA ÁREA 3

FONTE: A AUTORA

Finalmente, aplicando-se os critérios de seleção de telhados que levam em consideração a compacidade, a deficiência convexa e a orientação dos telhados, foi possível selecionar, nas áreas de estudo, alguns prédios que podem ser interessantes para a implantação de módulos coletores de energia solar, como mostra a figura 60, 61 e 62. Neste caso, o modelo geométrico estimado, considerando as dimensões dadas pelo tamanho dos eixos e da orientação do segmento, foi superposto à imagem do MDSn para ilustrar o método.

Percebe-se que nem todos os prédios foram adequadamente modelados. Porém, deve-se salientar que, a meta do estudo não é obter a descrição fidedigna dos contornos dos prédios, mas sim uma estimativa de seu potencial para a geração de energia fotovoltaica.

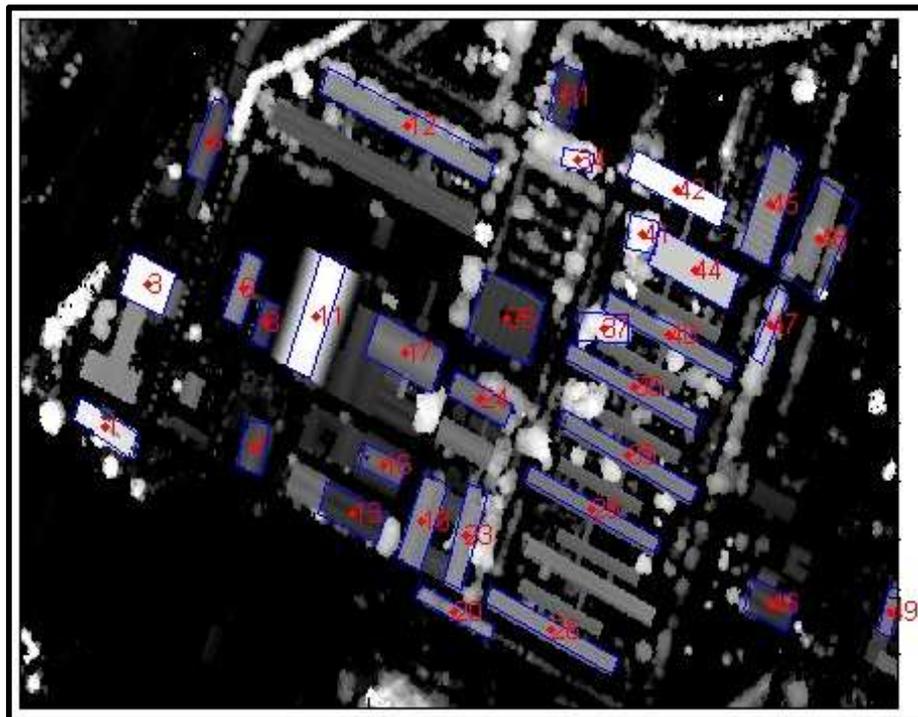


FIGURA 60 - PRÉDIOS SELECIONADOS NA ÁREA 1

FONTE: A AUTORA

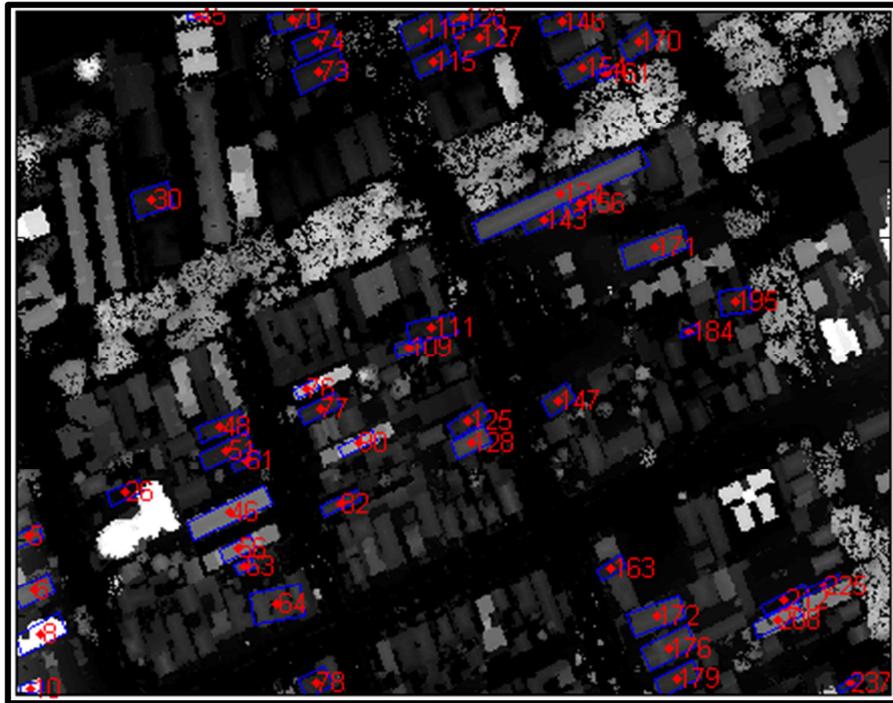


FIGURA 61 - PRÉDIOS SELECIONADOS NA ÁREA 2

FONTE: A AUTORA

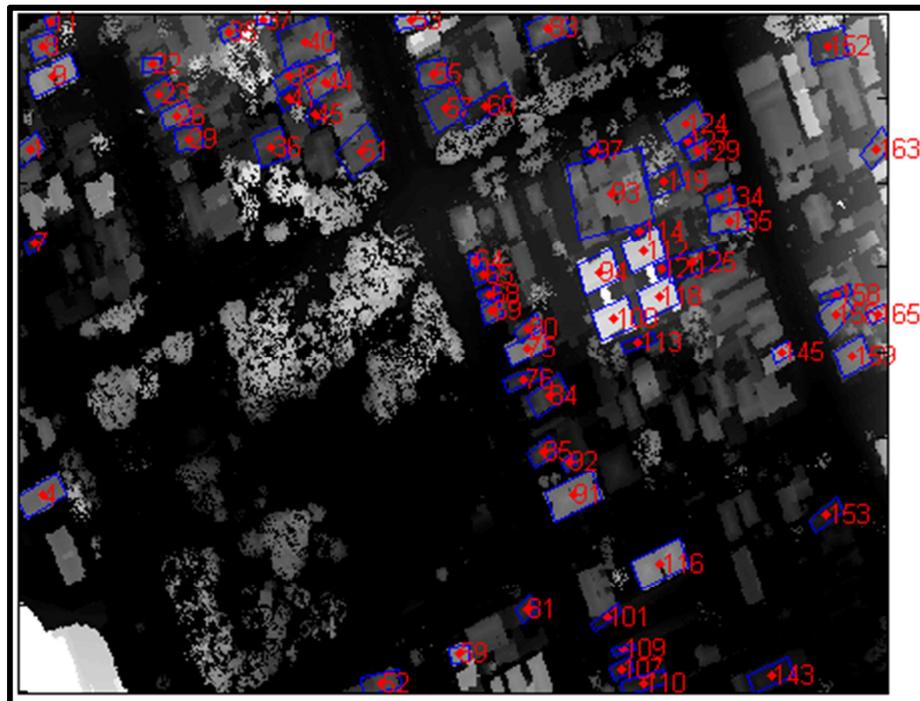


FIGURA 62 - PRÉDIOS SELECIONADOS NA ÁREA 3

FONTE: A AUTORA

4.2 DISCUSSÕES

Com os parâmetros geométricos dos telhados selecionados, foram calculados os potenciais para cada um deles. Os valores gerados podem ser conferidos de acordo com as tabelas de cada área de estudo.

4.2.1 Área de estudo 1

Primeiramente, selecionou-se para a área 1, duas pequenas regiões para testes, de acordo com a figura 63, utilizando os métodos topográficos e manuais. Esta região é caracterizada por três edificações com bordas bem definidas e isoladas, sendo que o primeiro prédio, correspondente a figura 61a, possui telhado com uma só face, e os outros dois prédios apresentam telhados com duas águas, vistos na figura 61b.

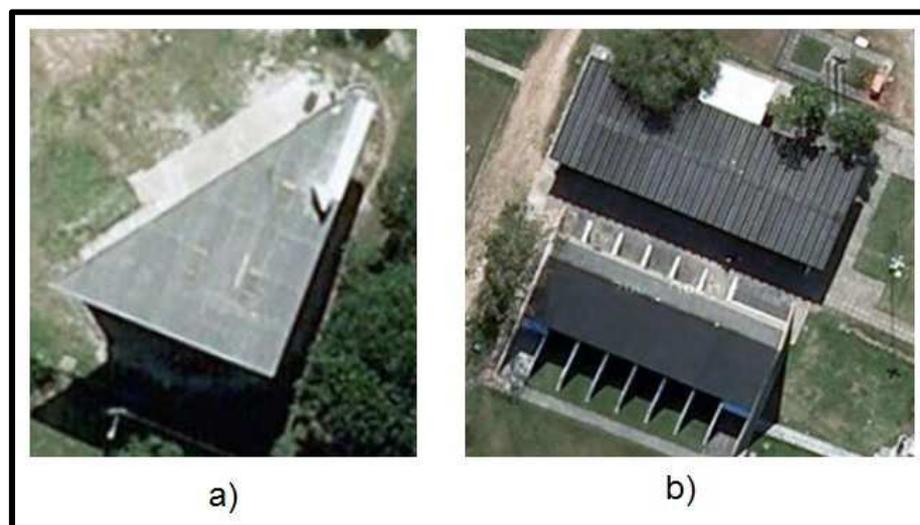


FIGURA 63 – PRÉDIOS CALCULADOS COM MÉTODO TOPOGRÁFICO

FONTE: A AUTORA

A tabela 2 mostra os valores de área, inclinação e orientação de cada cobertura, medidas de forma direta, com a estação total, e ao lado, nas últimas colunas, os mesmos valores, calculados com a partir do método manual.

Método	Topográfico			Manual			Diferença absoluta			Diferença (%)		
Amostra ID (Edif.)	Área (m ²)	Incl.	Orien.									
Prédio 1	197,19	10,47	20,00	203,31	11,03	20,27	6,12	0,56	0,27	3,10	5,35	1,35
Prédio 2	298,86	4,31	21,00	315,18	4,98	21,33	16,32	0,67	0,33	5,46	15,55	1,57
Prédio 3	384,71	54,79	21,00	406,15	55,11	21,42	21,44	0,32	0,42	5,57	0,58	2,00

TABELA 2 – RESULTADOS TOPOGRÁFICO, MANUAL E DIFERENÇAS

FONTE: A AUTORA

O potencial fotovoltaico foi calculado com base nos valores de área para cada orientação e inclinação. Para cada cálculo foi considerado o valor de um painel com eficiência média (10,67%), dentre os painéis disponíveis no mercado brasileiro. Na tabela 3, estão representados os valores de E (kWh/ano), que é a quantidade de energia fotovoltaica gerada pelo sistema, para cada prédio e suas diferenças relativas e percentuais.

Método	Topográfico	Manual	Diferença absoluta	Diferença (%)
Amostra ID (Edif.)	E (kWh/ano)	E (kWh/ano)	E (kWh/ano)	E (kWh/ano)
Prédio 1	29979,15	30909,13	929,98	3,10
Prédio 2	45436,84	47917,69	2480,86	5,46
Prédio 3	58488,16	61748,18	3260,02	5,57

TABELA 3 – QUANTIDADE DE ENERGIA GERADA PELO SISTEMA COM OS DADOS DA ESTAÇÃO TOTAL E MANUAL

FONTE: A AUTORA

Nos valores gerados a partir dos dois métodos de cálculo, nota-se que houve um pouco de diferença devido ao cálculo com a estação total ser mais preciso do que o manual. Porém, conclui-se que o método manual é viável por apresentar resultados próximos do topográfico. Por isso, o manual será adotado como

referência para as outras áreas, onde não há dados do método topográfico.

Para outras edificações da área 1, os valores foram calculados usando o método manual e digital, resultado do processo de segmentação dos telhados. A tabela 4 mostra os dois resultados, bem como a diferença relativa e percentual em relação ao valor de referência, neste caso, o do método manual.

Amostra	Manual			Digital			Diferença Absoluta			Diferença (%)		
	Área (m ²)	Inclin.	Orient.	Área (m ²)	Inclin.	Orient.	Área (m ²)	Inclin.	Orient.	Área (m ²)	Inclin.	Orient.
6	42,71	7,0	160,0	45,91	40,3	156,3	3,19	33,3	-3,7	7	47	2
8	37,69	1,6	158,0	29,37	22,7	156,2	-8,33	21,1	-1,8	22	136	1
17	55,35	10,2	72,0	60,81	12,4	66,8	5,46	2,2	-5,2	10	2	7
26	108,83	23,1	65,0	114,85	24,9	66,6	6,02	1,8	1,6	6	1	2
29	109,77	24,1	66,0	118,25	30,3	66,8	8,48	6,2	0,8	8	3	1
42	78,17	23,5	70,0	83,84	0,0	66,8	5,67	-23,5	-3,2	7	10	5
44	68,19	4,3	70,0	73,68	34,5	66,6	5,50	30,2	-3,4	8	70	5
45	68,33	5,9	152,0	74,04	37,4	157,4	5,71	31,5	5,4	8	54	4

TABELA 4 – VALORES DE ÁREA, INCLINAÇÃO, ORIENTAÇÃO E SUAS DIFERENÇAS PARA A ÁREA 1

FONTE: A AUTORA

Na tabela 5, estão descritos os valores do potencial fotovoltaico, calculados pelos métodos manual e digital e suas diferenças.

Amostra ID (Edif.)	Manual	Digital	Diferença	
	E (kWh/ano)	E (kWh/ano)	Absoluta	%
6	6493,58	6979,08	485,50	7,48
8	5730,44	4464,69	-1265,75	-22,09
17	8414,90	9245,62	830,73	9,87
26	16545,57	17460,24	914,67	5,53
29	16688,29	17978,05	1289,76	7,73
42	11884,66	12746,66	862,00	7,25
44	10366,45	11201,98	835,53	8,06
45	10388,18	11256,90	868,72	8,36
MÉDIA	12358,87	13047,60	688,74	4,60

TABELA 5 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DO POTENCIAL FOTOVOLTAICO NA ÁREA 1

FONTE: A AUTORA

4.2.2 Área de estudo 2

Os valores da área 2, medidos com os métodos manual e digital estão representados na tabela 6, além dos valores das diferenças calculadas.

Método	manual			digital			Diferença		
Amostra	Área (m ²)	Inclin.	Orientação	Área (m ²)	Inclin.	Orientação	Área (%)	Inclin. (%)	Orient. (%)
ID (Edif.)									
46	43,6	8,3	104,0	42,0	12,2	106,0	4	47	2
48	16,8	18,0	105,0	22,3	21,0	109,4	33	17	4
51	27,2	11,3	116,0	25,4	18,8	114,0	7	66	2
61	13,6	16,5	115,0	14,1	38,5	113,8	4	133	1
74	23,9	17,7	107,0	21,6	29,0	110,1	10	64	3
77	21,7	21,8	109,0	20,3	26,8	112,3	6	23	3
82	21,3	40,6	108,0	19,9	32,0	110,9	7	21	3
115	20,0	18,1	111,0	18,4	18,6	113,7	8	3	2
128	19,7	21,8	114,0	18,5	20,5	113,6	6	6	0
147	16,5	26,0	119,0	15,3	17,5	121,8	7	33	2
171	34,3	11,4	112,0	32,8	33,7	110,0	4	196	2
172	27,3	19,7	111,0	27,0	26,5	109,9	1	34	1
179	23,5	26,8	117,0	21,5	20,6	115,6	8	23	1

TABELA 6 – VALORES DE ÁREA, INCLINAÇÃO, ORIENTAÇÃO E SUAS DIFERENÇAS PARA A ÁREA 2

FONTE: A AUTORA

Verifica-se que, entre os métodos, existem valores de área muito parecidos, como é o caso da edificação com o identificador 172. Por outro lado, valores muito diferentes também são encontrados, como é o caso do segmento 48, que apresenta um valor 33 % maior do que aquele que é considerado correto.

Diante dos valores da tabela 6 em conjunto com a figura 59 (página 81), é possível detectar algumas fontes de erro. Por exemplo, maiores erros podem ser esperados quando a área do segmento não corresponde à área correta. Isto afeta a estimativa da inclinação do telhado. Outra fonte de erro é na determinação do aspecto. Alguns prédios apresentam orientação diferente da real.

Na figura 64, representando a edificação 61, por exemplo, vemos que a vegetação foi incluída como prédio, gerando cota mais alta e, assim, alterando significativamente no valor da inclinação. Neste local, a vegetação não foi eliminada por que ela foi separada no processo de segmentação.

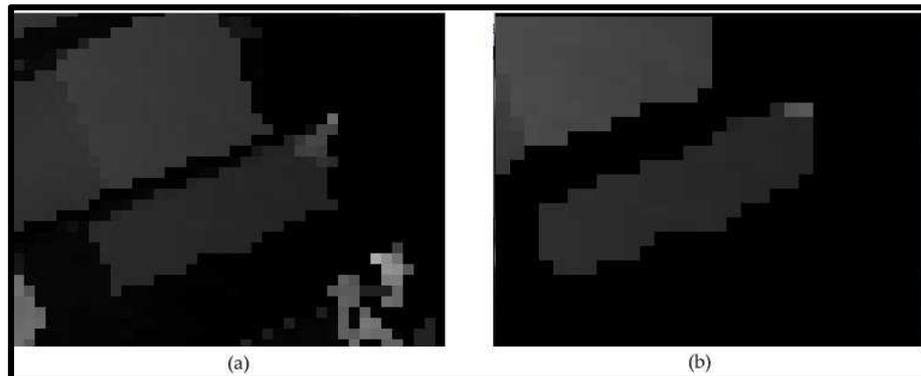


FIGURA 64 – REPRESENTAÇÃO DO MDSN (A) E DA SEGMENTAÇÃO (B) NA EDIFICAÇÃO 61

FONTE: A AUTORA

Na edificação 171, as bordas da área não ficaram muito bem definidas, como ilustra a figura 65. Conseqüentemente, houve erro de cota, pois a cota mínima foi coletada de um ponto fora do telhado, estando bem abaixo.

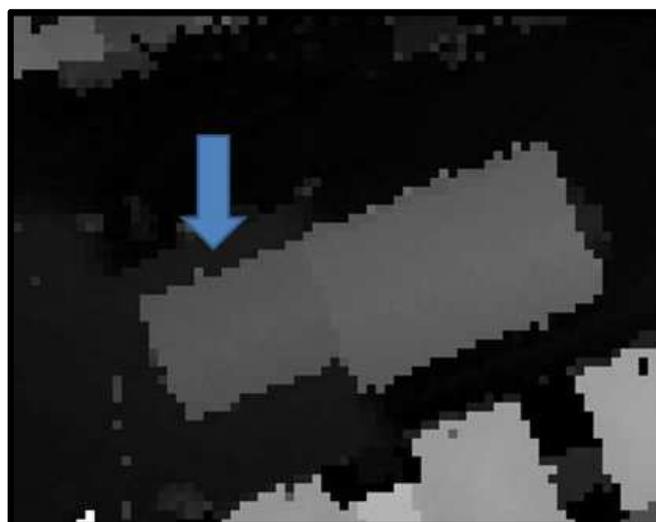


FIGURA 65 – EXEMPLO DE ERRO DE COTA

FONTE: A AUTORA

Neste outro exemplo da figura 66, da edificação 48, houve erro de área devido à duas edificações estarem geminadas, e na etapa da segmentação ser considerada apenas uma.

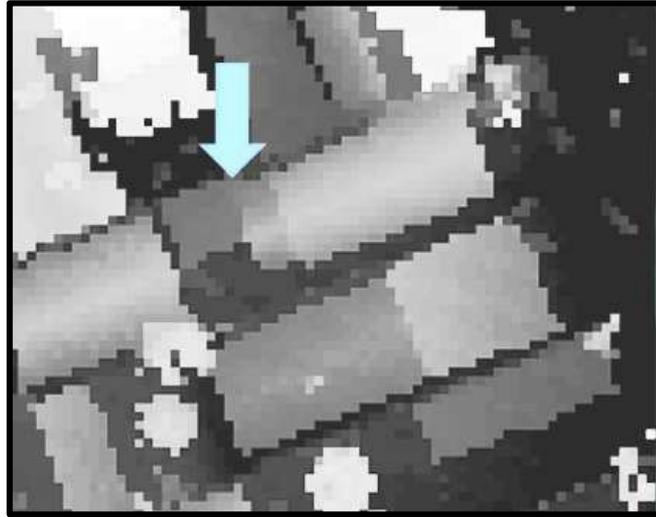


FIGURA 66 – ÁREAS GEMINADAS

FONTE: A AUTORA

Os valores do potencial fotovoltaico estão calculados na tabela 7 pelos métodos manual e digital e suas diferenças.

Método	Digital	Manual	Diferença	
Amostra	E (kWh/ano)	E (kWh/ano)	E (kWh/ano)	Diferença (%)
ID (Edif.)				
46	6391,43	6633,34	-241,91	3,65
48	3390,13	2558,16	831,97	32,52
51	3854,48	4136,97	-282,50	6,83
61	2144,85	2066,91	77,93	3,77
74	3287,19	3635,30	-348,12	9,58
77	3085,83	3293,71	-207,88	6,31
82	3025,17	3244,15	-218,97	6,75
115	2791,72	3037,03	-245,31	8,08
128	2819,25	3000,73	-181,48	6,05
147	2320,67	2505,29	-184,63	7,37
171	4991,76	5220,48	-228,72	4,38
172	4100,10	4148,40	-48,30	1,16
179	3275,35	3567,30	-291,95	8,18
MÉDIA	3789,83	3920,65	-130,82	8,72

TABELA 7 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DO POTENCIAL FOTOVOLTAICO NA ÁREA 2

FONTE: A AUTORA

Para esta análise, somente alguns prédios foram selecionados. A mesma abordagem foi aplicada na área 3, em uma região próxima no bairro Água Verde. Os resultados não serão todos apresentados, apenas o resumo da comparação do potencial fotovoltaico, como é mostrado na tabela 10.

4.2.3 Área de estudo 3

Os valores calculados pelos métodos manual e digital estão presentes na tabela 8, assim como a diferença relativa e percentual em relação ao valor de referência.

Amostra ID (Edif.)	Manual			Digital			Diferença (%)		
	Área (m ²)	Inclin.	Orient.	Área (m ²)	Inclin.	Orient.	Área (m ²)	Inclin.	Orient.
9	23,88	16,48	105,00	23,64	55,29	113,27	1,00	235,49	7,88
23	14,57	13,91	102,00	13,88	43,92	117,96	4,71	215,63	15,64
57	19,91	4,82	109,00	18,40	25,81	117,55	7,60	435,89	7,84
69	15,70	17,42	105,00	11,38	15,88	113,14	27,52	8,83	7,76
76	21,57	37,62	100,00	18,87	42,50	105,37	12,54	12,97	5,37
91	29,64	16,54	116,00	25,69	40,31	111,83	13,32	143,77	3,59
94	19,88	9,79	112,00	18,87	28,63	110,85	5,07	192,52	1,03
100	20,82	41,06	112,00	18,94	26,77	109,59	9,07	34,78	2,15
107	11,94	34,36	103,00	11,64	22,12	110,61	2,52	35,62	7,38
116	27,69	37,66	114,00	26,99	52,40	112,59	2,53	39,13	1,24
134	15,82	35,99	110,00	14,32	26,68	104,80	9,50	25,87	4,72

TABELA 8 – VALORES DE ÁREA, INCLINAÇÃO, ORIENTAÇÃO E SUAS DIFERENÇAS PARA A ÁREA 3

FONTE: A AUTORA

Os fatos observados nas áreas 1 e 2 se repetem neste experimento. Alguns telhados, como é o caso do segmento 69, apresentam erros em torno de 30%. Já outros são muito próximos do valor real, como por exemplo o segmento 76.

Os telhados selecionados nos dois recortes foram analisados em conjunto e foi preparado um histograma da frequência do erro relativo, como mostra a figura 67. Nesta figura, o eixo horizontal mostra a faixa do erro percentual, enquanto o eixo vertical mostra a frequência de telhados com erro na faixa, sendo que um total de 24 elementos foram analisados. O histograma mostra que para grande parte dos telhados pode ser esperado um erro entre 5-10% e que a ocorrência de grandes erros, em torno de 30-40% não é muito grande, pois houve apenas 2 casos.

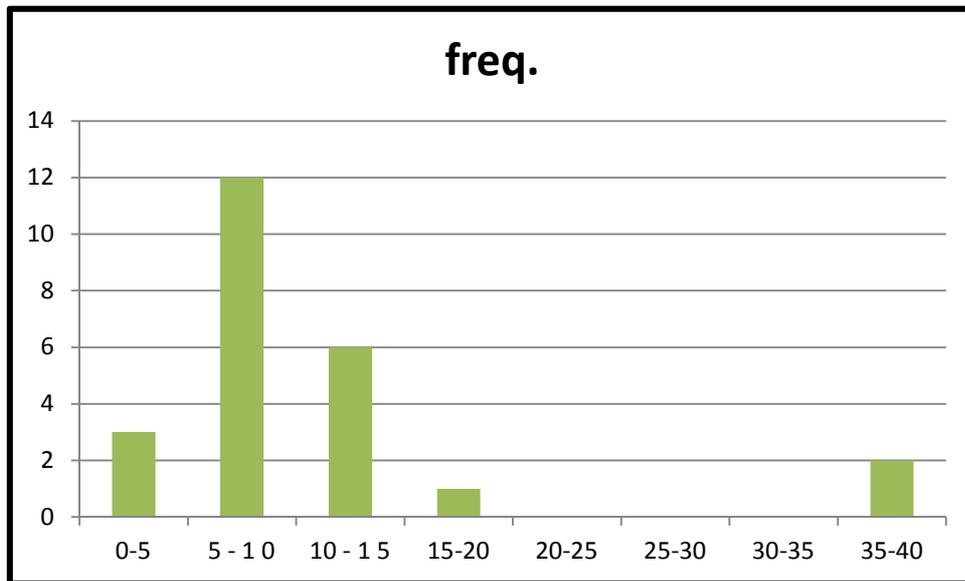


FIGURA 67 - ANÁLISE DA FREQUENCIA DO ERRO PARA AS ÁREAS TESTE 02 E 03.

FONTE: A AUTORA

Na área 3, os resultados do potencial fotovoltaico tiveram diferença máxima de pouco mais de 14% e estão descritos na tabela 9.

Amostra ID (Edif.)	manual	digital	diferença	
	E (kWh/ano)	E (kWh/ano)	E (kWh/ano)	%
9	4192,99	3630,33	562,66	13,4
23	2462,18	2214,75	247,43	10,0
57	3263,90	3027,69	236,22	7,2
69	1730,13	1482,97	247,16	14,3
76	3346,34	3279,71	66,63	2,0
91	4557,09	4506,51	50,58	1,1
94	3347,32	3022,46	324,86	9,7
100	3358,61	3166,05	192,55	5,7
107	1770,01	1815,81	45,80	2,6
116	4786,63	4209,38	577,25	12,1
134	2539,92	2405,71	134,21	5,3
MÉDIA	2946,26	2730,11	223,78	7,6

TABELA 9 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DO POTENCIAL FOTOVOLTAICO NA ÁREA 3

FONTE: A AUTORA

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 CONCLUSÕES

O presente trabalho tratou da avaliação do potencial do uso de técnicas de sensoriamento remoto, em especial com o sistema *LIDAR*, para o mapeamento de áreas para a instalação de painéis solares com potenciais fotovoltaicos e a análise preliminar da viabilidade do uso de energia solar. Os resultados apontam que é viável identificar áreas propícias para a instalação de células solares dentro de ambientes urbanos, embora o trabalho também tenha identificado algumas restrições.

O levantamento *LIDAR* permite modelar a geometria dos telhados, mas a qualidade da modelagem depende muito da densidade de pontos do levantamento e da mistura de objetos presentes na cena.

A abordagem utilizada para identificar prédios se baseia apenas nos dados *LIDAR*, analisando a textura das superfícies. A textura depende muito da densidade do levantamento, assim que o sucesso desta abordagem deve variar muito quando aplicada usando outros dados. É esperado que o sucesso seja maior, na medida em que a densidade aumentar. O mesmo ocorre com a definição das bordas dos telhados, pois elas são altamente dependentes da densidade da nuvem de pontos.

A estimativa automática da geometria dos telhados, mesmo que grosseira, é suficiente para um estudo preliminar. Os dados *LIDAR* permitem derivar a orientação dos prédios e sua superfície. O maior problema foi encontrado na estimativa da declividade. Em alguns planos de telhados, a estimativa foi prejudicada pela presença de objetos acima do telhado, como por exemplo, janelas que são integradas nos próprios telhados ou chaminés. Nestes casos, estas áreas não podem ser muito bem determinadas por este método, sendo estes objetos perturbadores não reconhecidos pelo algoritmo semiautomatizado.

O método foi mais eficiente em telhados de forma retangulares, pois nos telhados com formatos mais complexos, não houve bons resultados pelo fato de ser um método simples.

A segmentação utilizada não foi totalmente eficiente por, ainda, manter algumas árvores sobre as edificações, resultando em diferenças significativas entre os valores das alturas calculadas com o uso do *LIDAR* e pelos outros métodos.

Comparando os dados calculados com a estação total e com os dados obtidos por análise visual da imagem *LIDAR*, percebe-se que há pequena diferença nos valores sendo a medição utilizando a estação total é a mais precisa. Quando houver um projeto pequeno, este método é o mais adequado, porém é inviável quando feita em uma área muito extensa, que ocorre na maioria dos projetos de engenharia. Uma opção é a delimitação e estimativa manual da geometria dos telhados.

5.2 RECOMENDAÇÕES

Recomenda-se, então:

- a avaliação desta metodologia em outras regiões e com outras densidades de nuvem de pontos, para uma melhor eficiência do método na definição de bordas e detecção de planos;
- a exploração deste tema, com um método preciso de modelagem tridimensional de edificações, para uma melhor definição dos telhados, tanto isolados como conjugados;
- que seja realizada uma análise de sombreamentos dos prédios sobre os planos dos telhados para se obter estudo com mais precisão, sendo que este é um fator importante a ser considerado, tendo significativas variações durante o dia;
- trabalhos com sistemas fotovoltaicos interligados à rede elétrica para a verificação com que a forma do sistema se comporta e pode contribuir para as áreas dos centros urbanos.

REFERÊNCIAS

ACKERMANN, F. ***Airborne LASER scanning – present status and future expectations.*** ISPRS *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 54, p. 64-67. 1999.

ANDRADE, A.F. e CENTENO, J.A.S. **Integração de informações espectrais e de forma na classificação de imagens com redes neurais.** Bol. Ciênc. Geod., sec. Artigos, Curitiba, v. 9, no 2, p.217-231, jul-dez, 2003.

ANEEL. **Capítulo 3: Energia Solar.** ANEEL. Páginas 29 a 42. 2005.

BARBOSA, C. F. O., PINHO, J. T., GALHARDO, M. A. B., CRUZ, D. P. e ARAÚJO, R. G.. ***Implantation and Operation of the First Electricity Pre-Payment System in Brazil, Installed in an Isolated Community in the Amazon Region.*** São Paulo, 2004.

BURROUGH, P. A; Mc Donnell, R. A.. ***Principles of geographic information systems.*** Oxford, Oxford University Press. 1989.

CELINSKI, T. M., **Classificação de cobertura do solo utilizando árvores de decisão e sensoriamento remoto.** Tese de Doutorado. Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP. Universidade Estadual Paulista. 2008.

CENTENO, J. A. S. ; KISHI, R. T. ; MITISHITA, E. A. . **Aplicação de laser scanner para detecção de áreas para coleta de água de Chuva.** In: XIV SBSR, Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2009, Natal. Anais..., 2009. v. 1. p. 1-10.

CENTENO, J.A.S.; KISHI, R.T. E MITISHITA; E.A. **Detection of areas for rainwater harvesting using airborne laser scanner and aerial imagery.** *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, v. 198-199, p. 25-29, 2012.

CEPEL, CRESESB. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos.** Grupo de Trabalho de Energia Solar (GTES). 2ª Edição, Rio de Janeiro, RJ. Agosto, 2004.

COLLE, S.; PEREIRA, E. B.. **Atlas de irradiação solar do Brasil**. Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e Laboratório de Energia Solar (LABSOLAR) – EMC/UFSC. Brasília, 1998.

COMANICIU, D.; MEER, P.. **Mean Shift: A Robust Approach Toward Feature Space Analysis**. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. v. 24, n. 5, p. 603-619, 2002.

CRESESB. Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito **Atlas solarimétrico do Brasil**. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/publicações/atlas/solar.htm>> acessado em março 2012.

DADALTO, E. A.. **Utilização da energia solar para aquecimento de água para a população de baixa renda domiciliar em habitações populares**. Monografia. Departamento de Engenharia de Construção Civil, Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG. 2008. 117p.

DEWULF, J. LANGENHOVE, H. V.. (editors) **Renewables-based technology, sustainability assessment**, Research Group ENVOC, Ghent University, Belgium, 2006.

EDP no Brasil. Energias do Brasil – Energia Renovável. Disponível em: <http://www.energiasdobrasil.com.br/energia/pesquisadores_estudantes/energia_renovavel/energia_renovavel.asp> Acesso em: 25 de fevereiro de 2012.

EDP - Energias de Portugal. Disponível em: <<http://www.energiasdobrasil.com.br/energiarenovavel.asp>>. Acesso em: 18 de março de 2012.

FILHO, O. M.; NETO, H. V.. **Processamento Digital de Imagens**. Rio de Janeiro, RJ. Brasport, 1999.

FLORENZANO, T. G.. **Iniciação em Sensoriamento Remoto**. 3ª Edição ampliada e atualizada. São Paulo, SP. Oficina de Textos, 2011.

FRAIDENRAICH, N., et. al. **Energia solar fotovoltaica**. In: Maurício Tiomno Tolmasquim. (Org.). Fontes Renováveis de Energia no Brasil. Rio de Janeiro: Editora Interciência Ltda., 2003.

GEORGESCU, B.; SHIMSHONI, I.; MEER, P.. ***Mean Shift Based Clustering in High Dimensions: A Texture Classification Example***. In International Conference on Computer Vision (ICCV03), p. 456-463, 2003.

GOETZBERGER, A., HOFFMANN, V. U.. ***Fotovoltaic solar energy generation***. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Alemanha, 2005.

GONZALEZ, M. P.. **O Mito do alto Custo – Uma comparação entre a Energia Solar Fotovoltaica e a Energia Nuclear**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade Federal do ABC – UFABC. Santo André, 2010.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E.. **Processamento de imagens digitais**. Tradução: Roberto Marcondes Cesar Junior e Luciano da Fontoura Costa. São Paulo, SP. Bluncher, 4ª reimpressão, 2010.

HAALA, N.; BRENNER, C., ***Interpretation of urban surface models using 2D building information***. *Computer Vision and Image Understanding*. Vol 72, nº 2. November, 1999.

HAMAKAWA, Y. ***Solar PV Energy Conversion and the 21st Century's Civilization***. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, n. 74, p. 13-23, 2002.

HIPPENSTIEL, R.; BROWNSON, J. R. S.. **COMPUTING SOLAR ENERGY POTENTIAL OF URBAN AREAS USING AIRBORNE LIDAR AND ORTHOIMAGERY**. Department of Energy and Mineral Engineering, The Pennsylvania State University, United States of America. 2011.

INSTITUTO PARANAENSE DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. **Caderno estatístico do município de Curitiba**. Curitiba, Dezembro de 2012.

KASSNER, R.; KOPPE, W.; SCHUTTENBERG, T. BARETH, G.. **Analysis of the solar potential of roofs by using official LIDAR data**. GIS & Remote Sensing Group, Department of Geography, University of Cologne, Germany. 2007

KERSTING, A. B. **Mapeamento de obstáculos sob a faixa de domínio de linhas de transmissão usando um abordagem orientada a objeto, tecnologia LIDAR e**

câmara digital de pequeno formato. Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências Geodésicas. Curitiba, 2006.

LORENZO, Eduardo. ***Electricidad Solar Fotovoltaica. Sobre el papel de la energia em la historia.*** Volumen 1. España: Progensa, 2006.

MACHADO, A. M. L.. **Extração automática de contornos de edificações utilizando imagem gerada por câmara digital de pequeno formato e dados LIDAR.** Tese apresentada ao Curso de Pós- Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Ciências Geodésicas. Curitiba, 2006.

MAYER, H. ***Automatic Object Extraction from Aerial Imagery – A Survey Focusing on Buildings.*** Computer Vision and Image Understanding. v. 74, n. 2, 1999. p. 138-149.

RÜTHER, R. **Edifícios Solares Fotovoltaicos: O Potencial da Geração Solar Fotovoltaica Integrada a Edificações Urbanas e Interligada à Rede Elétrica Pública no Brasil.** Editora UFSC/LABSOLAR, Florianópolis, 2004.

ROAF, S.; Fuentes, M.; Thomas, S.. **Ecohouse: A casa ambientalmente sustentável.** Tradução: Alexandre Salvaterra. 2ª Edição. Porto Alegre, RS. Bookman, 2006.

RODRIGUES, C. **Mecanismos Regulatórios, Tarifários e Econômicos na Geração Distribuída: o caso dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede.** Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

RODRIGUES, Maria J. A ***Integração arquitectónica de Energia Solar Fotovoltaica.*** Companhia de Arquitectura e Design. Instituto Superior Técnico. 2005. Disponível em:
<http://www.ikaza.com.pt/presentationlayer/artigo_01.aspx?id=14&CANAL_ORDEM=0402> Acesso em: 01 de março de 2012.

SAHAR, L.; KRUPNIK, A. ***Semiautomatic Extraction of Building Outlines from Large Scale Aerial Images.*** Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, v. 65, n. 4, 1999. p. 459-465.

SALAMONI, I. T.. **Metodologia para cálculo de geração fotovoltaica em áreas urbanas aplicada a Florianópolis e Belo Horizonte**. Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Santa Catarina, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre. Florianópolis, 2004. 155p.

SANTOS, D. R.. **Notas de aula da disciplina Fotogrametria**. Curso de pós-graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2010.

SCHEER, H.. **Economia Solar Global – Estratégias para a Modernidade Ecológica**. CRESESB. Rio de Janeiro, RJ. 2002. BARBOSA, C. F. O., PINHO, J. T., GALHARDO, M. A. B., CRUZ, D. P. e ARAÚJO, R. G. (2004).

SITHOLE, G.; VOSSelman, G.. **Automatic Structure Detection in a Point Cloud of an Urban Landscape**. In: Proceedings 2nd GRSS/ISPRS Joint Workshop on Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas, Berlin, Germany, pp. 67-71, 2003.

TOMÁS, L.R.. **Inferência populacional urbana baseada no volume de edificações residenciais usando imagens IKONOS-II e dados LiDAR**. 108 p. (INPE-16712-TDI/1651). Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2010.

VOEGTLE, T.; STEINLE, E.; TÓVÁRI, D.. **Airborne laserscanning data for determination of suitable areas for photovoltaics**. In: ISPRS WG III/3, III/4, V/3 Workshop "LASER scanning 2005", Enschede, the Netherlands, September 12 – 14, 2005. 6p.

Weidner U., W. Forstner. **Towards Automatic Building Extraction from High Resolution**. *Digital Elevation Models*, ISPRS Journal, Vol. 50, No. 4, pp. 38–49. 1995.

OBRAS CONSULTADAS

ALONSO, R. H.. **Sistema autônomo de comunicação sem fio em malha alimentado por energia solar fotovoltaica.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação da Escola Politécnica. Universidade de São Paulo – USP. São Paulo, 2009. 101p.

ARA, P. J. S.. **Desempenho de sistemas de condicionamento de ar com utilização de energia solar em edifícios de escritórios.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação da Escola Politécnica. Universidade de São Paulo – USP. São Paulo, 2010. 192p.

BENEDITO, R. S.. **Caracterização da geração distribuída de eletricidade por meio de sistemas fotovoltaicos conectados à rede, no Brasil, sob os aspectos técnico, econômico e regulatório.** Dissertação de Mestrado. Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo – USP. São Paulo, 2009. 110p.

BERNAL, J. L. O.. **Modelagem para o aproveitamento sustentável dos biocombustíveis, energia eólica e solar dentro do PIR local: Estudo de caso do PIR da região de Araçatuba.** Dissertação de Mestrado. Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo – USP. São Paulo, 2009. 140p.

CARR, J. A. et al.. **A Comparison of the Performance of Different PV Module Types in Temperature Climates.** Solar Energy, n.75, p. 285-294, 2004.

CASTRO GIL, M. et. al.. **Energia solar fotovoltaica.** *Monografias Técnicas de Energias Renovables. España:* PROGNSA, 2000.

COLACIOS, R. D.. **A produção científica em energias alternativas no Estado de São Paulo – o caso do PIPGE/USP (1992 a 2002).** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em História Social. Universidade de São Paulo – USP. São Paulo, 2009. 196p.

COUTINHO, D. J. **Estudo e caracterização de dispositivos fotovoltaicos orgânicos (OPV) baseados em heterojunção de volume.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Física. Universidade de São Paulo – USP. São Carlos, 2011. 101p.

DILAY, E.. **Modelagem, simulação e otimização de uma unidade de aquecimento de água e refrigeração por absorção de alimentação híbrida a coletor solar e gás combustível.** Dissertação de Mestrado. Programa Interdisciplinar de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Paraná – UFPR. Curitiba, 2008. 83p.

FURTADO, M. C.. **Avaliação das oportunidades de comercialização de novas fontes de energias renováveis no Brasil.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação da Escola Politécnica. Universidade de São Paulo – USP. São Paulo, 2010. 126p.

IHRC – International Hurricane Research Center – Florida International University
Disponível em: < <http://lidar.ihrc.fiu.edu/aboutlidar.html> > Acesso em 21 de fevereiro de 2012.

JANUÁRIO, A. C. V.. **O mercado de energia elétrica de fontes incentivadas: Proposta para sua expansão e implicações na câmara de comercialização de energia elétrica.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação da Escola Politécnica. Universidade de São Paulo – USP. São Paulo, 2007. 123p.

LOBO, A. F. **Simulação de sistemas de aquecimento solar com materiais em mudança de fase (MMF) adaptados de resíduos pesados do refino do petróleo sob condições transitórias de insolação e demanda.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia. Universidade Federal do Paraná - UFPR. Curitiba, 2004.122p.

LORENZO, Eduardo. ***Electricidad Solar Fotovoltaica. Sobre el papel de la energía en la historia. Volumen 1. España: Progenza, 2006.***

MARQUES, D. D.; BRITO, A. U.; CUNHA, A.. **Estudo da radiação solar para geração de energia em sistemas descentralizados no Estado do amapá.** Macapá, s/d.

MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B.; GUARNIERI, R. A.; SILVA, S. A. B.; YAMASHITA, C. S.; CHAGAS, R. C.; ABREU, S. L.; COLLE, S.. **Mapeamento dos recursos de**

energia solar no Brasil utilizando modelo de transferência radiativa. In: I CBENS - I Congresso Brasileiro de Energia Solar. Fortaleza, 8 a 11 de abril de 2007.

MATAJS, R. R.. **Demanda, Consumo e Custo das alternativas ao chuveiro elétrico: O exemplo do Estado de São Paulo.** Dissertação de Mestrado. Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo – USP. São Paulo, 1997. 174p.

MELÉNDEZ, T. A. F.. **Avaliação de sistemas fotovoltaicos de bombeamento.** Dissertação de Mestrado. Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo – USP. São Paulo, 2009. 87p.

MENDONÇA, B. V.. **Estudo da problemática da aplicação de coletores solares para aquecimento de água, no segmento residencial de alto padrão, com base em escalas de projeto arquitetônico e dimensões de planejamento.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação da Escola Politécnica. Universidade de São Paulo – USP. São Paulo, 2009. 192p.

MESQUITA, M.. **Mercado brasileiro do uso de aquecedores solar.** Departamento Nacional de Aquecimento Solar da ABRAVA. Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento. s/d. 21p.

MOCELIN, A. R.. **Implantação e gestão de sistemas fotovoltaicos domiciliares: Resultados operacionais de um projeto piloto de aplicação da resolução da ANEEL nº 83/2004.** Dissertação de Mestrado. Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo – USP. São Paulo, 2007. 151p.

MORAES, G. I.. **Energia e sustentabilidade no Paraná: Cenários e perspectivas 2007 – 2023.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Econômico, Universidade Federal do Paraná – UFPR. Curitiba, 2005. 126p.

MORALES, R. L. V.. **A utilização de sistemas fotovoltaicos de bombeamento para irrigação em pequenas propriedades rurais.** Dissertação de Mestrado. Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo – USP. São Paulo, 2011. 170p.

NADAL, C. A.. **Insolação de Paredes Verticais.** Departamento de Geomática, Universidade Federal do Paraná – UFPR. 4ª edição. Curitiba, 2003. 49p.

PROENÇA, E. D. R. B.. **A energia solar fotovoltaica em Portugal: Estado-da-Arte e Perspectivas de Desenvolvimento**. Dissertação de Mestrado. Engenharia e Gestão Industrial, Instituto Superior Técnico – Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa, 2007. 88p.

RAIMO, P. A.. **Aquecimento de água no setor residencial**. Dissertação de Mestrado. Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo – USP. São Paulo, 2007. 125p.

SIMIONI, C. A.. **O uso de energia renovável sustentável na matriz energética brasileira: obstáculos para o planejamento e ampliação de políticas sustentáveis**. Tese de Doutorado. Programa de Doutorado e Meio ambiente, Universidade Federal do Paraná – UFPR. Curitiba, 2006. 314p.

Sithole, G. ; G. Vosselman. 2003. **Comparison of Filter Algorithms**. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. 34, Part 3/W13, pp. 71-78.

Solar Brasil Tecnologia & Energia Fotovoltaica Ltda.. **Cartilha de Energia Solar: Aplicações e Viabilidade do Sistema**. Solar Brasil Tecnologia & Energia Fotovoltaica Ltda. São Paulo, edição de 2010. 8p.

SOUZA, G. V.; CENTENO, J. A. S.; MACHADO, A. M. L.. **Estimating Solar Energy Production Potential of Urban Region using LASER scanner Data and High Resolution Image**. In: *6th International Symposium on Mobile Mapping Technology*, Presidente Prudente, São Paulo, Brazil. July, 21 – 24 , 2009. 4p.

SPRENGER, R. L.. **Aplicação do sistema fechado no aquecedor solar de água de baixo custo para reservatórios residenciais isolados termicamente: Concepção e comissionamento de um sistema-piloto de testes**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Universidade Federal do Paraná – UFPR. Curitiba, 2007. 105p.

VALE, B. & R. (1980). **A casa auto-suficiente**. Editorial Presença. Lisboa, Portugal.

WACHBERGER, M. & H. (1984). **Construir com o sol – Utilização da energia solar passiva**. Editorial Gustavo Gilli S. A.. Barcelona, Espanha.