



Lucas Jamiro Barbosa

**DETECÇÃO E EXTRAÇÃO DE VEGETAÇÃO UTILIZANDO DADOS
LIDAR: Determinação de indivíduos e aglomerados**



Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas (PPGCC)

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS CARTOGRÁFICAS
CAMPUS DE PRESIDENTE PRUDENTE

LUCAS JAMIRO BARBOSA

**DETECÇÃO E EXTRAÇÃO DE VEGETAÇÃO UTILIZANDO DADOS LIDAR:
DETERMINAÇÃO DE INDIVÍDUOS E AGLOMERADOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da FCT – Faculdade de Ciência e Tecnologia da UNESP – Universidade Estadual “Júlio de Mesquita Filho”.

Orientador: Prof. Dr. **Maurício Galo**

FICHA CATALOGRÁFICA

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação - Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação - UNESP, Campus de Presidente Prudente

B199d Barbosa, Lucas Jamiro.
Detecção e extração de vegetação utilizando dados lidar : determinação de indivíduos e aglomerados / Lucas Jamiro Barbosa. - Presidente Prudente : [s.n.], 2017
88 f. : il

Orientador: Mauricio Galo
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia
Inclui bibliografia

1. Dados lidar. 2. Extração de árvores. 3. Delimitação de copas. I. Galo, Mauricio. II. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências e Tecnologia. III. Título.

Alessandra Kuba Oshiro Assunção
CRB-8/9013



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Presidente Prudente

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Detecção e extração de vegetação utilizando dados LIDAR:
determinação de indivíduos e aglomerados

AUTOR: LUCAS JAMIRO BARBOSA

ORIENTADOR: MAURICIO GALO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em CIÊNCIAS
CARTOGRÁFICAS, área: AQUISIÇÃO, ANÁLISE E REPRESENTAÇÃO DE INFORMAÇÕES
ESPACIAIS pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. MAURICIO GALO
Departamento de Cartografia / Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente



Prof. Dr. ALUIR PORFIRIO DAL POZ
Departamento de Cartografia / Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente



Prof. Dr. VERALDO LIESENBERG
Centro de Ciências Agroveterinárias / Universidade do Estado de Santa Catarina

Presidente Prudente, 28 de abril de 2017

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Jamiro e Sueli, e aos meus irmãos, Luciano e Leandro. Por todo amor, apoio e dedicação impelidos ao longo de toda a vida, com amor, dedico.

AGRADECIMENTOS

À energia que habita todas as coisas desse universo e que algumas pessoas nomeiam como: Deus. Também à toda corrente mediúnica que me acompanha e sempre me ajudou a sair dos piores momentos!

Aos meus pais, Jamiro e Sueli, e meus irmãos, Luciano e Leandro. Que sempre estiveram ao meu lado, me ajudando e apoiando em todas as escolhas. Minha sincera e eterna gratidão, eu amo vocês e sinto muito orgulho da família que tenho! Sem vocês ao meu lado nada disso seria completo.

Aos meus sobrinhos, Pietra e João Pedro, que acompanharam o final desta etapa e estiveram comigo no dia mais importante deste trabalho. O tio babão jamais vai esquecer os dois bebês mais lindos que já estiveram em uma defesa desta Pós-Graduação.

À minha eterna melhor amizade, Nathalie, que de forma indireta sempre esteve ao meu lado. Nunca vou cansar-me de dizer como sou grato ao universo por tê-la como vizinha e por essa amizade durar mais de 20 anos. Te amo!

Ao meu orientador, Prof. Dr. Mauricio Galo, por ser a melhor pessoa que o universo poderia ter reservado nesta graduação e pós-graduação! Meu eterno agradecimento por aceitar a minha orientação durante esses quatro anos e pelos ensinamentos passados.

Aos dois grandes amigos que esta pós-graduação me proporcionou, salvando-me dos momentos de loucura e desespero, com fim de tardes regadas a bolo e coxinha. Quem diria que esses 10 dias de Buenos Aires iriam criar uma amizade tão bacana assim! Crislaine e Paulo, muito obrigado por formarem comigo o melhor trio! Uma amizade bonita dessas, bicho?!

À minha ex-namorada, Amanda Letícia, que apesar de não participar do fim desta etapa foi fundamental durante o início dela. Minha eterna gratidão pelos momentos de compreensão e apoio durante o estresse do fim da graduação somado ao começo do mestrado, você foi fundamental para que isso acontecesse! Aos amigos provenientes desta etapa: Melina, Mariana, Gabriel, Nicole e João Victor, obrigado pelos momentos de diversão.

Aos amigos de graduação: Tobias (Tobishow), Guilherme (Alemão), Fernanda Lima (Felina), Raphaela Leli (Raphaleli), Luiz Eduardo (Guil) e outros, que me acompanharam ao longo de todos estes anos de UNESP. Aos amigos de pós-

graduação: Gabi Takahashi, Marcus, Raquel, Renato e André, pelas trocas de ideias. E aos demais amigos do PPGCC, muito obrigado!

À Cidinha e Zilda, as quais transformavam nosso ambiente de trabalho em nossas casas. Muito obrigado pelo carinho e quitutes, vou sentir saudades!!

Aos membros da banca, Prof. Dr. Veraldo Liesenberg e Prof. Dr. Aluir Porfírio Dal Poz, pelas valiosas sugestões acrescentadas a este trabalho, tanto na banca de qualificação quanto na de defesa.

A todos os professores de graduação e pós-graduação pelo inestimável conhecimento compartilhado nestes sete anos de UNESP. Em especial aos professores que me inspiraram pela busca da docência: Professor Mauro, Professora Maria de Lourdes, Professor Erivaldo e Professor Galo.

À empresa Sensormap Geotecnologia por fornecer as imagens ópticas e os dados de varredura a LASER utilizados nesta pesquisa.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão de bolsa de mestrado, bem como pelo suporte financeiro em diferentes projetos (307788/2012-1, 304189/2016-2), ao longo do desenvolvimento desta pesquisa.

Por fim, gostaria de agradecer todas as pessoas que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a realização desta pesquisa. Muito obrigado a todos!

*“The trouble is, humans do have a knack of choosing
precisely those things that are worst for them.”*
J.K. Rowling

RESUMO

O Sensoriamento Remoto tem-se mostrado, nos últimos anos, uma excelente ferramenta na aquisição de informações da cobertura da Terra. Dentre os diversos sensores remotos, o sistema de aquisição de dados por varredura LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) se apresenta como uma ferramenta poderosa na coleta de informações tridimensionais. A tecnologia lidar (*Light Detection And Ranging*), quando a bordo de aeronaves, pode ser denominada como *Airborne Laser Scanning (ALS)*, diferente dos sistemas aerofotogramétricos de imageamento tradicionais, permite coletar, simultaneamente, pontos com coordenadas 3D sobre copas de árvores, bem como o terreno abaixo dela, em função da capacidade de registro de múltiplos retornos e da divergência do pulso. Por esta razão, esta tecnologia tem sido utilizada em diversas aplicações florestais, como manejo e recuperação florestal, silvicultura, exploração madeireira, dentre outras. Diversas pesquisas têm mostrado a possibilidade de utilização dos dados lidar na extração e delimitação de indivíduos arbóreos e, portanto, na estimativa de variáveis dendrométricas. Desta forma, o desenvolvimento de técnicas que proporcionem a automatização no delineamento das copas das árvores e na estimativa destas informações é de grande interesse. Contudo, grande parte das pesquisas relacionadas à detecção de árvores, delimitação de copa e estimativa de algumas variáveis são desenvolvidas considerando cenários homogêneos e específicos, onde a vegetação é caracterizada pela presença de árvores coníferas e/ou decíduais, ou florestas de exploração madeireira. Portanto, o objetivo desta pesquisa foi a implementação e avaliação de uma técnica que permita detectar indivíduos arbóreos e aglomerados, considerando um cenário urbano heterogêneo e complexo; e, destes indivíduos, estimar variáveis dendrométricas como área da copa; altura da árvore; e raio médio da copa. A metodologia proposta é realizada em três etapas e se baseia no uso do método de crescimento de regiões, aplicado à nuvem de pontos originais, ordenados quanto à altura. Além disso, são usados polígonos convexos visando a extração de indivíduos arbóreos e aglomerados. Para isso, são utilizados três parâmetros: distância mínima, *buffer* e perímetro comum. Foram realizados experimentos considerando dados reais e cenários diferentes em uma área urbana, para diferentes conjuntos de parâmetros utilizados no processo de delimitação das copas. Os mesmos foram avaliados quanto a acurácia temática, completeza e *F-Score*, calculados em função de referências obtidas de forma manual. Na delimitação de indivíduos arbóreos e aglomerados, simultaneamente, o maior valor de *F-Score* foi de 54% e na delimitação de indivíduos e aglomerados, em separado, o melhor resultado obtido foi 74% e 39%, respectivamente. Embora melhorias possam ser feitas visando aumentar estes indicadores, principalmente para aglomerados, pode-se considerar que o método proposto tem potencial de aplicação, sobretudo quando se tem por objetivo a extração de árvores individuais em ambiente urbano.

Palavras-chave: Dados lidar. Varredura LASER. Detecção de árvores. Delimitação de copas. Extração de árvores. Variável dendrométrica.

ABSTRACT

Remote Sensing has shown to be, in the last years, an excellent way of acquiring Earth's surface data. Among all remote sensors, the system of data acquisition by LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) scanning has been presented as a powerful tool for three-dimensional information collection. lidar (Light Detection And Ranging) technology, when onboard of airplanes can be named Airborne Laser Scanning (ALS) and, differently from traditional photogrammetric techniques, allows the collection of simultaneously 3D points over tree crowns, as well as the ground underneath it, due to the recording capacity of multiple echoes arising from the divergence of the pulse. For this reason, this technology has been used in many different forest applications, as management and forest recovery, forestry, logging and others. Some researchers have shown the possibility of using lidar data on tree extraction and crown delineation and, therefore, on the estimation of their dendrometric variables. In this way, the development of techniques that can provide the automation of tree crowns delineation and estimation of this information has increased. However, most of the researches performed ever related to tree detection, canopy delineation and estimation of some dendrometric variables are developed considering homogeneous and specific scenarios where the vegetation is characterized by the presence of coniferous and/or deciduous trees. For this purpose, the objective of this research was the implementation and evaluation of a technique capable of detecting individual trees and clumps, considering a heterogeneous urban scenario. Additionally, from those individual trees some dendrometric variables such as crown area; tree height and average crown radius were estimated. Experiments were conducted considering different study areas in an urban environment varying the parameters used in the crown delineation process. Those experiments were evaluated in terms of thematic accuracy, completeness and F-Score, computed based on reference values obtained manually. When the simultaneous delimitation of arboreal individuals and agglomerates was performed the best F-Score was 54%. For independent processing, the best result was 74% and 39%, respectively, for individuals and agglomerates. Although improvements can be performed aiming to improve those indicators, mainly to clumps, it is possible to consider that the proposed method has potential, especially when the objective is the extraction of individual trees in an urban environment.

Keywords: Lidar data. LASER scanning. Tree detection. Canopy delimitation. Tree extraction. Dendrometric variable.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização geográfica dos dados usados em pesquisas relacionadas a extração de vegetação a partir de dados <i>lidar</i> , destacadas no Quadro 1	25
Figura 2 - Coleta da nuvem de pontos com sistema de varredura.....	28
Figura 3 - Exemplo de sistemas de varredura e seus respectivos padrões. Espelho oscilante (a), polígono rotativo (b), espelho nutante (c) e comutador de fibra óptica (d)	29
Figura 4 - Reflexão parcial do pulso LASER e múltiplos retornos.....	30
Figura 5 - Sistema GNSS e Sistema inercial	31
Figura 6 - Sistemas envolvidos na aquisição de dados lidar	32
Figura 7 - Etapa de criação do CHM. Pontos classificados (a), pontos de vegetação normalizados e filtrados (b), pontos de vegetação regularizados e suavizados (c)	37
Figura 8 - Conceito de vizinhança-4 (a) e (b) e vizinhança-8 (c).....	39
Figura 9 - Definição de um polígono convexo	40
Figura 10 - Elementos da matriz confusão: Presença de todos os elementos – TP, FP, TN e FN (a), ausência de falso negativo (b) e ausência de falso positivo (c).....	42
Figura 11 - Áreas de estudos selecionadas: Centro de Pres. Prudente (a), Campus da UNESP (b) e Parque do Povo (c)	44
Figura 12 - Fluxograma do pré-processamento.....	46
Figura 13 - Geração do Modelo Digital de Superfície Normalizada (MDSn): MDS e MDT (a) e MDSn (b)	47
Figura 14 - Esquema conceitual do processamento.....	47
Figura 15 - Fluxograma do processamento	48
Figura 16 - Esquema conceitual do pós-processamento.....	49
Figura 17 - Polígono referência (P^R), em vermelho, e polígono teste (P^T), na cor verde: vértices (a) e pontos de intersecção (b)	50
Figura 18 - Fluxograma do pós-processamento	51
Figura 19 - Análise quanto ao limiar de altura máxima e mínima: Fluxo de teste (a) e exemplo de segmentos excluídos ou não, pelo limiar de altura (b).....	52
Figura 20 - Pós-processamento considerando P_{pc} como: 5% (a), 10% (b), 15% (c), 20% (d), 25% (e), 30% (f), 35% (g), 40% (h), 45% (i), 50% (j), 55% (k), 60% (l), 65% (m), 70% (n), 75% (o), 80% (p), 85% (q) e 90% (r)	55

Figura 21 - Centro: Em (a) tem-se a imagem de referência, em (b) a nuvem de pontos classificada, em (c) a nuvem filtrada de forma automática e em (d) o resultado a filtragem manual..... 57

Figura 22 - UNESP: Em (a) tem-se a imagem de referência, em (b) a nuvem de pontos classificada, em (c) a nuvem filtrada de forma automática e em (d) o resultado a filtragem manual..... 60

Figura 23 - Parque do Povo: Em (a) tem-se a imagem de referência, em (b) a nuvem de pontos classificada, em (c) a nuvem filtrada de forma automática e em (d) o resultado a filtragem manual..... 63

Figura 24 - *F-Score* para a delimitação de indivíduos arbóreos (linhas) e aglomerados (colunas) – Região Centro 66

Figura 25 - Resultados correspondentes ao melhor (a) e ao pior (b) índice de qualidade..... 67

Figura 26 - Destaque para alguns dos indivíduos arbóreos extraídos de aglomerados. Os círculos e elipses amarelos caracterizam árvores individuais que se conectam a um aglomerado, mas foram extraídas de forma individual 68

Figura 27 - *F-Score* para a delimitação de indivíduos arbóreos (linhas) e aglomerados (colunas) - UNESP 69

Figura 28 - Resultados que correspondem ao melhor (a) e ao pior (b) índice de qualidade 69

Figura 29 - *F-Score* para a delimitação de indivíduos arbóreos (linhas) e aglomerados (colunas) – Parque do Povo 71

Figura 30 - Resultados correspondentes ao melhor (a) e ao pior (b) índice de qualidade para o Parque do Povo 71

Figura 31 - Indicador de qualidade geral das diferentes configurações para todas as áreas 73

Figura 32 - Centro de Presidente Prudente: Mapa de referência (a), melhor resultado para indivíduos (b), melhor resultado para aglomerados (c) e melhor resultado para ambos (d) 75

Figura 33 - Campus da UNESP/PP: Mapa de referência (a), melhor resultado para indivíduos (b), melhor resultado para aglomerados (c) e melhor resultado para ambos (d) 76

Figura 34 - Parque do Povo: Mapa de referência (a), melhor resultado para indivíduos (b), melhor resultado para aglomerados (c) e melhor resultado para ambos (d)..... 77

Figura 35 - Mapa de referência - Área central de Pres. Prudente..... 85

Figura 36 - Mapa de referência - Campus UNESP/PP 86

Figura 37 - Mapa de referência - Parque do Povo de Pres. Prudente 87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Número de segmentos obtidos pelo processamento (Centro)	58
Tabela 2 - Número de indivíduos e aglomerados obtidos pelo pós-processamento (Centro) ..	58
Tabela 3 - Índices de qualidade na seleção dos indivíduos arbóreos (Centro).....	59
Tabela 4 - Índices de qualidade na seleção de aglomerados (Centro).....	59
Tabela 5 - Número de segmentos obtidos pelo processamento (UNESP)	61
Tabela 6 - Número de indivíduos e aglomerados obtidos pelo pós-processamento (UNESP)	61
Tabela 7 - Índices de qualidade na seleção dos indivíduos arbóreos (UNESP).....	62
Tabela 8 - Índices de qualidade na seleção de aglomerados (UNESP).....	62
Tabela 9 - Número de segmentos obtidos pelo processamento (Parque do Povo).....	64
Tabela 10 - Número de indivíduos e aglomerados obtidos pelo pós-processamento (Parque do Povo).....	64
Tabela 11 - Índices de qualidade na seleção dos indivíduos arbóreos (Parque do povo) .	65
Tabela 12 - Índices de qualidade na seleção de aglomerados (Parque do povo)	65
Tabela 13 - Índice de qualidade (<i>F-Score</i>) médio das amostras	72
Tabela 14 - Melhores e piores índices de qualidade para as três áreas considerando a delimitação de indivíduos arbóreos, aglomerados e ambos simultaneamente.....	74

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Pesquisas relacionadas a extração de vegetação, seus métodos e localização geográfica.....	18
Quadro 2 - Nomenclatura de alguns dos indicadores de qualidade.....	41
Quadro 3 - Informações gerais das áreas de estudo.....	45

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Considerações iniciais.....	16
1.2	Estado da arte	18
1.3	Hipótese	23
1.4	Objetivos.....	24
1.5	Justificativa	25
1.6	Estrutura do trabalho	26
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	28
2.1	Sistema de varredura à LASER aerotransportado	28
2.2	Estimativa de variáveis dendrométricas por meio de dados lidar	33
2.3	Estrutura de dados	35
	2.3.1 Rede de triângulos irregulares.....	35
	2.3.2 Modelo de altura de copa	36
	2.3.3 Voxel.....	37
2.4	Crescimento de região	38
2.5	Polígono convexo.....	39
2.6	Análise de qualidade.....	41
3	MATERIAL E MÉTODO	44
3.1	Áreas de estudo	44
3.2	Material	45
3.3	Método	46
	3.3.1 Pré-processamento.....	46
	3.3.2 Processamento	47
	3.3.3 Pós-processamento	49
	3.3.4 Estimativas dendrométricas	52
4	EXPERIMENTOS E RESULTADOS	54

4.1	Área central de Presidente Prudente	56
4.2	UNESP	60
4.3	Parque do Povo	63
5	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	66
5.1	Área central de Presidente Prudente	66
5.2	UNESP	68
5.3	Parque do povo	70
5.4	Síntese dos resultados	72
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	78
	REFERÊNCIAS	81
	APÊNDICE A – MAPA DE REFERÊNCIA: ÁREA CENTRAL DE PRESIDENTE PRUDENTE.....	85
	APÊNDICE B – MAPA DE REFERÊNCIA: CAMPUS DA UNESP/PP	86
	APÊNDICE C – MAPA DE REFERÊNCIA: PARQUE DO POVO DE PRESIDENTE PRUDENTE.....	87

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

Nos últimos anos, percebe-se uma crescente ênfase na discussão de questões ambientais e, neste sentido, diversos estudos ambientais vêm sendo realizados cada vez com mais frequência, de modo a propor soluções sustentáveis e ágeis, dada a grande dinâmica dos fenômenos. Por esta razão, a necessidade e o desenvolvimento de ferramentas que possibilitem a medição de informações acerca dos objetos de interesse, de forma indireta, rápida e confiável, tem crescido. Neste contexto, o Sensoriamento Remoto surge como alternativa na coleta de dados, por meio de sensores ativos ou passivos. Sensores passivos são capazes de registrar a resposta radiométrica dos alvos e, para isso, é essencial que exista uma fonte de energia em direção ao alvo para que este possa refletir parte desta energia em direção ao sensor. Já os sensores ativos possuem a capacidade de emitir sua própria radiação eletromagnética (REM) e, desta forma, podem realizar medidas em situações adversas, como: presença de nuvem, voos noturnos, entre outros. Dentre os sistemas ativos, ressalta-se o sistema de aquisição de dados por medida de distância utilizando luz, conhecido em inglês por *Light Detection and Ranging* (lidar) que, por meio da emissão de um pulso amplificado de luz estimulada, conhecida também como LASER - *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, permite determinar a distância entre o emissor e o receptor.

O sistema lidar tornou-se amplamente utilizado pela comunidade de Sensoriamento Remoto e Fotogrametria, por tratar-se de uma fonte confiável de coleta de dados. O processamento dos dados brutos obtidos pelo sensor resulta em uma nuvem de pontos com coordenadas tridimensionais conhecidas, devido à integração de sistemas auxiliares, como o *Global Navigation Satellite System* (GNSS); *Inertial Navigation System* (INS) e a unidade de gravação, responsável por armazenar as informações coletadas. Por esta razão, e de acordo com Vosselman (2000), os sistemas lidar permaneceram por um longo período como melhor solução na produção de Modelos Digitais de Superfícies (MDS) e, em consequência disto, diversas pesquisas foram desenvolvidas objetivando a geração de Modelos Digitais de Terreno (MDT) (AXELSSON, 1998; SITHOLE e VOSSELMAN, 2005).

Aplicações com as mais diversas finalidades promoveram a utilização de sistemas lidar em diferentes plataformas de aquisição, como terrestre, aérea e orbital. Quanto a aplicações terrestres, é possível exemplificar a detecção e mapeamento de zonas de desmoronamento (JABOYEDOFF et al., 2012), mapeamento de fachadas arquitetônicas,

reconstrução de troncos (CENTENO, MITISHITA e MACHADO, 2014) e plantações agrícolas (ROSSEL e SANZ, 2012). Já quanto a sistemas acoplados a satélites têm-se, por exemplo, a utilização do sistema de aquisição *Geoscience Laser Altimeter System* (GLAS) a bordo do satélite ICESat (*Ice, Cloud and Land Elevation Satellite*) que realiza a coleta sistemática e seletiva de um conjunto de pontos pelo globo (PANG et al., 2008), sendo destinado ao monitoramento do balanço de gelo, nuvens, aerossóis, dentre outros elementos. Uma vez a bordo de aeronave o sistema LIDAR é denominado *Airborne LASER Scanning* (ALS) podendo ser utilizado nas mais variadas aplicações, como: detecção de telhados, rodovias, cabos de alta tensão, vegetação, dentre outras.

Diferente da aerofotogrametria tradicional, que realiza a aquisição das imagens por meio da luz refletida na região do visível do espectro eletromagnético, o sistema lidar permite a geração de um conjunto de pontos, também conhecido como nuvem de pontos, com coordenadas tridimensionais conhecidas, a partir do uso da região infravermelho do espectro eletromagnético (PETRIE e TOTH, 2008). Além disso, o pulso emitido pela unidade LASER apresenta baixa divergência, sendo assim altamente colimado e coerente quanto a sua propagação. Por esta razão, o ALS pode apresentar uma penetração nos alvos, como copas não densas por exemplo, o que permite ao mesmo não só mapear a cobertura mais superficial da área sobrevoada, como dosséis, telhados e solos não cobertos, mas também objetos que estejam abaixo dela, como galhos, troncos, rochas superficiais e outros.

As primeiras utilizações de dados lidar em aplicações florestais são reportadas por Nelson, Krabill e MacLean (1984) onde os autores propõem a determinação da relação entre os dados obtidos por sistemas lidar, densidade de árvores e altura das mesmas. Com relação ao manejo florestal, Aldred e Bonnor (1985) apresentam as principais aplicações florestais que poderiam ser desenvolvidas na época, por meio de dados lidar, como a determinação de altura de árvores e a densidade de indivíduos arbóreos. MacLean e Krabill (1986) apresentam um estudo preliminar da possibilidade da utilização dos dados na determinação de volume de troncos em aplicações de manejo florestal para comercialização. Desde então, o número de pesquisas que envolvem a utilização destes dados, em aplicações florestais, tem crescido consideravelmente.

1.2 Estado da arte

A delimitação da copa de indivíduos arbóreos tem sido alvo de pesquisas em diversas áreas, com destaque para as ciências florestais, há muitos anos. Muitas técnicas de processamento e análise de imagens, como: crescimento de região, *watershed*, ajustamento de superfícies, e outras, vêm sendo adaptadas, de modo a serem utilizadas com dados provenientes de sensores lidar. O Quadro 1 apresenta algumas pesquisas que foram conduzidas buscando a extração de árvores, destacando-se o método empregado e o país onde foram realizados.

Quadro 1 - Pesquisas relacionadas a extração de vegetação, seus métodos e localização geográfica

Ano	Autor	Método	País
2001	Hyypä et al. (2001)	Crescimento de região	Finlândia
2002	Persson, Holmgren e Söderman (2002)	Ponto de máximo	Suécia
2003	Brandtberg et al. (2003)	Teoria espaço-escala	EUA
2003	Leckie et al. (2003)	Segmentação por vales	Canadá
2004	Mei e Durrieu (2004)	<i>Watershed</i>	França
2004	Pitkänen et al. (2004)	Filtragem baseada na altura;	Finlândia
2004	Popescu e Wynne (2004)	Janela de tamanho variável	EUA
2004	Morsdorf et al. (2004)	Agrupamento por K-média	Suíça
2006	Chen et al. (2006)	<i>Watershed</i>	EUA
2006	Falkowski et al. (2006)	Janela de tamanho variável	EUA
2006	Koch, Heyder e Weinacker (2006)	<i>Watershed</i> invertido	Alemanha
2007	Kwak et al. (2007)	Transformação estendida de máximo	Coreia do Sul
2007	Zandoná, Lingnau e Nakajima (2007)	Janela de tamanho variável	Brasil
2007	Martins et al. (2007)	Crescimento de região	Brasil
2008	Pang et al. (2008)	Crescimento de região	EUA
2008	Reitberger et al. (2008)	Corte normalizado	Alemanha
2009	Dalponte et al. (2009)	Derivação de polinômio	Itália
2009	Rahman e Gorte (2009)	<i>Watershed</i> invertido	Holanda
2009	Reitberger et al. (2009)	<i>Watershed</i>	Alemanha
2010	Lee et al. (2010)	Crescimento de região	EUA
2010	Alves (2010)	Máximo local; Análise morfológica	Brasil
2011	Tittmann et al. (2011)	Ajuste de modelo geométrico (StarSac)	EUA
2012	Ene, Næsset e Gobakken (2012)	<i>Watershed</i> baseado em marcações	Holanda
2012	Smits et al. (2012)	Máximo global; LM com máscara gaussiana	Letônia
2012	Jing et al. (2012)	Integração de segmentos por <i>watershed</i> multi-layer	Canadá
2012	Li et al. (2012)	Crescimento de região	EUA
2013	Hu et al. (2013)	Integração de segmentos por <i>watershed</i> multi-layer	Canadá
2014	Duncanson et al. (2014)	<i>Watershed</i> multi-layer	EUA
2014	Lu et al. (2014)	Aproximação raiz-copa	EUA
2014	Véga et al. (2014)	Segmentação baseada em pontos	França
2014	Pereira et al. (2014)	Crescimento de região	Brasil
2015	Mongus e Zalik (2015)	<i>Watershed</i>	Eslovênia

Fonte: Autor (2017)

A partir do Quadro 1, pode-se observar que muitos métodos foram desenvolvidos e uma das primeiras tentativas visando a delimitação de indivíduos arbóreos por meio de dados lidar foi o trabalho de Hyypä et al. (2001). Neste trabalho, os autores propõem a adaptação de um procedimento de crescimento de região em um modelo regular de altura denominado Modelo de Altura de Copa, do inglês *Canopy Height Model* (CHM), que possa mimetizar as características de uma imagem (mais detalhes na Seção 2.3.2). Pereira et al. (2014) apresentam um estudo que objetivou a extração de árvores individuais de araucárias (*Araucaria angustifolia*) em Santa Catarina. Para isso, os autores realizam a conversão dos dados lidar em CHM, a partir de pontos sementes, definidos pelos máximos locais e aplicam um crescimento de região de modo a delimitar os indivíduos. Uma vez que os indivíduos tenham sido extraídos, informações dendrométricas como: diâmetro da copa, altura da árvore e diâmetro do tronco, são extraídas e comparadas com dados medidos em campo.

Lee et al. (2010) também fizeram uso do método de crescimento de região, porém sem realizar a conversão dos pontos para malha regular. O método também foi utilizado no Brasil por Martins et al. (2007), que sugerem o processo de segmentação similar ao proposto por Hyypä et al. (2001), em um conjunto florestal de eucaliptos (*Eucalyptus sp.*). Li et al. (2012) apresentam uma segmentação que também faz uso do método de crescimento de região, porém, utilizando a relação espacial entre os indivíduos arbóreos. Outro método de agrupamento de pontos, amplamente utilizado em imagens, e que foi adaptado para o uso com dados lidar, foi o método K-médias, sendo utilizado por Morsdorf et al. (2004) para extrair contorno de árvores.

A busca de pontos de máximo, ou ápices de árvores, também se mostrou como método alternativo no processo de segmentação de árvores. Persson, Holmgren e Söderman (2002) propõem o mapeamento de pontos de máximos locais em CHMs suavizados por diferentes filtros gaussianos. Pitkänen et al. (2004) introduzem três métodos de segmentação de árvores, todos fazendo uso de modelos regular de copas. O primeiro é chamado "Filtragem baseada na altura", no qual o CHM é dividido em imagens diferentes, de acordo com a altura dos pontos. As imagens são, então, suavizadas por meio de filtros gaussianos com valores de suavização diferentes para cada uma delas. Na sequência, as posições das árvores são obtidas por máximos locais. O segundo método, chamado "Máxima Eliminação", se baseia na coleta de uma grande quantidade de possíveis ápices de árvore por uma filtragem de máximos locais e, em seguida, esses máximos são reduzidos com base em um conjunto de critérios. E, por fim, no terceiro método, intitulado "Detecção de Bolhas Laplaciana", as imagens são divididas em

intervalos de 5 m e suavizadas por uma função de Laplace. Em seguida, as imagens são fundidas e uma função que determina mínimos locais é aplicada para determinar as localizações dos limites das árvores. Smits et al. (2012) apresentam dois métodos, um baseado em pontos de máximo local e outro global. Além disso, os autores fazem uso de imagens multiespectrais que auxiliam o processo de segmentação.

Popescu et al. (2002) apresentam um método baseado na utilização de janelas de tamanho variado no processo de segmentação, onde o tamanho da janela é dado em função de um polinômio que relaciona a altura da árvore com o diâmetro da copa esperado. Popescu e Wynne (2004) propõem uma adaptação do trabalho apresentado anteriormente, onde novos modelos de copas, mais gerais, são apresentados. Contudo, para utilizar os diferentes modelos é necessário a utilização de imagens multiespectrais junto aos dados lidar. O método foi aplicado no Brasil por Zandoná, Lingnau e Nakajima (2007), sendo que neste caso o polinômio teve que ser remodelado para atender a realidade de uma floresta de pinheiros (*Pinus sp.*), em Pinhais – Paraná. Brandtberg et al. (2003) descrevem um procedimento de extração de árvores baseado na teoria do espaço escala. Para isso, o CHM é suavizado considerando três níveis de suavização, o processo de segmentação é realizado em cada um dos níveis e um processo de crescimento de região é utilizado nos fragmentos de modo a gerar os segmentos de árvores. Leckie et al. (2003) utilizam uma metodologia de perseguição de vales onde os limites das copas são determinados pelos pontos de mínimo. Falkowski et al. (2006) propõem um método de segmentação baseado em análises espaciais de *wavelet* para identificar e estimar diâmetro de copas e altura de árvores.

Outro método muito utilizado para a extração de feições em imagens é denominado *watershed*, que se baseia no uso da Morfologia Matemática que, assim como o crescimento de região teve sua metodologia adaptada para a realidade de dados lidar. Chen et al. (2006) sugerem uma inversão no modelo de copa e a aplicação do método baseado em marcações. Ene, Næsset e Gobakken (2012) também apontam um processo de mapeamento dos pontos de máximo que se baseia na inversão do modelo de copa e, posteriormente, é segmentado por meio do método supracitado.

Diversos autores propõem uma abordagem diferente, onde o CHM não é invertido e sim o método adaptado para lidar com a realidade do modelo de copa. Mei e Durrieu (2004) sugerem a criação de uma máscara binária que caracterize pontos de solo e vegetação, e a partir dos pontos de vegetação aplica-se o segmentador. Koch, Heyder e Weinacker (2006) realizam um mapeamento dos possíveis ápices de árvores e, a partir destes, realizam a

segmentação; ao final uma etapa de pós processamento é aplicada de modo a otimizar o resultado.

Rahman e Gorte (2009) apresentam um novo formato de estrutura de dados que se baseia em um modelo de densidade de pontos. Por esta razão, os autores assumem que a concentração de pontos é sempre maior próxima ao centro da árvore que na borda. De acordo com os autores, a utilização deste novo modelo pode apresentar um resultado melhor quando comparado com a utilização de CHM. Kwak et al. (2007) descrevem uma segmentação baseada em *watershed* que é realizada em uma imagem de distância euclidiana, sendo esta imagem obtida por um processo de mapeamento que utiliza uma transformação estendida de máximo. Mongus e Žalik (2015) sugerem que o processo de suavização de um CHM seja realizado por meio da transformada de *Hough* e um ajustamento por mínimos quadrados de três superfícies: plana, côncava e convexa. Uma vez que os pontos de máximo sejam obtidos, o segmentador é aplicado fazendo uso de uma função de bordas com peso que permite detectar pontos críticos que caracterizem as bordas das copas, delimitando-as. Em seguida, em uma etapa de pós processamento, os segmentos são avaliados quanto a critérios de altura, área e forma. O resultado desta avaliação são três valores de pesos que são utilizados em uma etapa de fusão dos segmentos.

Reitberger et al. (2008) fazem uso do conjunto de dados estruturado em *voxels*, e propõem a segmentação das árvores por corte normalizado. Para isso, os autores utilizam uma função de similaridade. Já Reitberger et al. (2009) aprimoram o método anteriormente apresentado, de modo a aceitar outras fontes de dados resultantes de etapas intermediárias, como uma segmentação prévia de copa por *watershed*, detecção de troncos e ajuste dos pontos e, por fim, a segmentação tridimensional por corte normalizado.

Pang et al. (2008) sugerem a delimitação das copas por meio da geração de oito perfis centralizados nos pontos de máximo, sendo os pontos adicionados aos perfis considerando um conjunto de critérios. Por meio da derivação de um polinômio de 4ª ordem que se ajusta a cada perfil, é possível determinar o ponto crítico do fim da copa de cada árvore. Dalponte et al. (2009) apresentam uma segmentação baseada no processo de mapeamento por janela de tamanho variado e derivação de polinômios de perfis, como apresentado anteriormente. Os pontos interiores ao cilindro de raio médio são selecionados como pertencentes ao segmento.

Tittmann et al. (2011) introduzem um método de segmentação baseada no ajuste de pontos às superfícies, por meio da técnica *RANdom Sample Consensus* (RANSAC),

onde os pontos de máximo são utilizados como origem dos modelos geométricos definidos pelos autores. Em função deste método ser aplicado a uma floresta de coníferas, os autores sugerem a utilização de três modelos: cônico, parabólico e misto.

Jing et al. (2012) utilizam um método de segmentação baseado em *watershed* por marcações utilizando um CHM. Todavia, o diferencial da metodologia empregada é a etapa de filtragem que conta com um processo de suavização pela operação matemática de abertura com elemento estruturante variante, gerando assim três imagens suavizadas: grosseira, mediana e fina. Desta forma, com as imagens suavizadas geradas, uma etapa de mapeamento identifica os possíveis ápices arbóreos e deles a segmentação é iniciada. Posteriormente, os segmentos encontrados nas diferentes imagens são comparados quanto a critérios estabelecidos, como circularidade, por exemplo. O processo de comparação é realizado considerando pares de imagem, desta forma, a imagem grosseira é comparada com a mediana e, a resultante desta comparação é, então, comparada com a imagem de resolução fina. Ao final de cada etapa de comparação tem-se os melhores segmentos possíveis, resultantes das análises de circularidade da união dos segmentos fundidos em um único segmento. Hu et al. (2013) apresentam um aprimoramento da técnica desenvolvida anteriormente, onde novas análises são realizadas nos segmentos ao final da etapa de comparação para fusão de segmentos. Este pós-processamento considera três parâmetros: o valor de circularidade, o coeficiente de variação da altura e o tamanho do segmento. Ademais, os autores sugerem a utilização dos pontos tridimensionais, onde os pontos interiores aos segmentos determinados anteriormente são utilizados de modo a gerar perfis topográficos da copa. Segundo os autores, espera-se que um segmento que represente uma única copa apresente somente uma moda. Desta forma, ao detectar mais de uma moda em um perfil altimétrico, os autores realizam uma re-segmentação do segmento em questão, porém, por meio do método K-médias.

A proposta de Duncanson et al. (2014) objetiva a segmentação de uma área de mata fechada com presença de sub-bosque. Para isso, os autores propõem uma segmentação baseada em *watershed* em um CHM. De modo similar ao descrito anteriormente, os autores sugerem a utilização do segmento de forma limitante aos pontos 3D. Os pontos são utilizados para gerar um histograma que relacione a altura da árvore com o número de pontos, em intervalos de altura predefinidos. Aos histogramas gerados são aplicados um algoritmo que busca por pontos que definam mais de uma moda. Caso o algoritmo determine mais de uma moda, os pontos são separados em dois ou mais CHMs. Uma vez que todos os segmentos tenham sido analisados, todos os novos CHMs são re-segmentados.

O método proposto por Lu et al. (2014) faz uso de um conjunto de dados lidar coletado em uma floresta de árvores decíduas, no período do inverno, ou seja, sem a presença de folhas. O método de segmentação se dá por meio de uma abordagem raiz copa, onde os pontos de tronco são identificados com base no seu valor de intensidade e então, a partir dos pontos de mínimo, cada tronco é estabelecido por um processo de agregação de pontos baseada em um conjunto de critérios. Uma vez que todos os troncos tenham sido selecionados, a etapa de adensamento da copa é iniciada, sendo um algoritmo de crescimento de região utilizado de modo a construir os galhos que formem as respectivas copas dos indivíduos. De modo a evitar que galhos e arbustos sejam caracterizados como troncos separados, ao final do processo os troncos e árvores são filtrados de modo a remover segmentos que não atendam aos seguintes requisitos: apresentar um comprimento de no mínimo 3 m e possuir seu ponto mais baixo com altura menor que 15 m.

Véga et al. (2014) propõem um segmentador baseado em propriedades dos pontos. O segmentador proposto realiza as segmentações de forma múltipla, onde o número de pontos utilizados (5 a 100) para determinar os valores de alguns parâmetros usados na segmentação é alterado a cada nível. O total de pontos utilizados define o raio de ação que o segmentador deverá utilizar no processo de segmentação. Para isso, os pontos são ordenados de forma decrescente quanto a altura e segmentados considerando critérios estabelecidos pelos autores. Este processo é repetido para os n níveis definidos e ao final os segmentos encontrados em cada um dos níveis são avaliados por meio de 4 parâmetros (tamanho, circularidade, orientação e regularidade), resultando em uma nota de segmento. Então, os níveis são comparados par a par considerando as pontuações obtidas. Ao final, obtêm-se os segmentos mais propensos a formar indivíduos arbóreos e destes, os pontos de máximo são extraídos para serem utilizados como semente. A partir destas sementes uma nova segmentação é realizada considerando um modelo de vizinhança adaptativa.

1.3 Hipótese

A detecção e extração de vegetação por meio de sensores remotos têm sido alvo de estudos há anos. Com o avanço tecnológico das diversas formas de aquisição de dados, como imagens multiespectrais e hiperespectrais, por exemplo, foi possível proporcionar um melhor resultado, porém, considerando um espaço bidimensional. Com a introdução dos sistemas de aquisição ativos, como LIDAR, foi possível detectar e mensurar informações

vegetacionais em um espaço tridimensional. Diversos estudos vêm sendo realizados, principalmente após os anos 2000, visando a extração e até mesmo a modelagem de indivíduos arbóreos; porém, considerando realidades florestais específicas, como florestas boreais de coníferas e/ou árvores decíduais que apresentam copas com formatos regulares e bem definidos, como cones, por exemplo. Desta forma, dado o padrão heterogêneo na distribuição de espécies em ambientes tropicais e considerando a diversidade da vegetação presente em ambientes urbanos, a seguinte questão pode ser formulada: É possível detectar e extrair indivíduos e aglomerados arbóreos, em ambiente urbano, a partir de dados lidar, considerando uma vegetação heterogênea quanto à espécie, tamanho e forma? Em função desta colocação a seguinte hipótese é formulada:

“A detecção e extração de indivíduos arbóreos e aglomerados, de forma automática, em regiões urbanas de vegetação heterogênea, podem ser realizadas a partir de dados lidar por meio de técnica de crescimento de região com pontos ordenados quanto a altitude e utilização de polígonos convexos.”

1.4 Objetivos

O objetivo geral dessa dissertação é explorar o potencial de dados lidar aerotransportado, visando a identificação e seleção de indivíduos arbóreos e aglomerados em ambiente urbano. Com este propósito busca-se desenvolver um procedimento que possibilite a detecção e extração de indivíduos arbóreos e aglomerados de vegetação, de forma automática.

Com este propósito, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar o uso de técnicas de seleção de indivíduos arbóreos, a partir de dados lidar;
- Propor e implementar uma metodologia capaz de selecionar indivíduos únicos e/ou aglomerados a partir de dados lidar, considerando um cenário urbano, no Brasil;
- Estimar informações dendrométricas acerca dos indivíduos e aglomerados extraídos pelo método proposto; e
- Aplicar e avaliar a funcionalidade da metodologia proposta, com base em dados reais.

1.5 Justificativa

O uso de dados lidar na caracterização de feições acima da superfície do solo mostra-se uma ferramenta muito poderosa. Diversas pesquisas vêm sendo desenvolvidas com o objetivo de detectar, extrair e até mesmo modelar indivíduos arbóreos com a intensão de determinar suas variáveis dendrométricas, como altura, diâmetro da copa, volume da copa, tronco, etc. Todavia, a partir do levantamento bibliográfico realizado e apresentado no Quadro 1, grande parte dos estudos com este foco foi realizada no hemisfério norte. Estas regiões possuem florestas onde predomina a presença de árvores coníferas e/ou decíduas, as quais podem ser aproximadas a modelos geométricos cônicos e paraboloides.

Figura 1 - Localização geográfica dos dados usados em pesquisas relacionadas a extração de vegetação a partir de dados lidar, destacadas no Quadro 1



Fonte: Autor (2017)

Como pôde ser observado, pouco tem sido explorado sobre a utilização de dados lidar na detecção, extração e modelagem de árvores em regiões com vegetações mistas. No Brasil, alguns grupos de pesquisas trabalham na utilização destes dados no processo de detecção e extração de indivíduos arbóreos e suas variáveis dendrométricas. Zandoná, Lingnau e Nakajima (2007) propõem o desenvolvimento de uma metodologia de segmentação para florestas de *Pinus sp.*, Martins et al. (2007) sugerem a utilização de um método para a determinação da altura de *Eucalyptus sp.*, enquanto Alves (2010) apresenta um estudo que objetiva a determinação de variáveis dendrométricas por meio de perfilamento LASER em uma floresta de araucária. Deste modo, percebe-se que existe espaço para o estudo e desenvolvimento de metodologias e ferramentas que possibilitem a extração de árvores,

considerando um contexto onde existe uma grande diversidade de espécies de vegetação em ambiente urbano.

Segundo Vengadeswari e Rajalakshmi (2013), o primeiro propósito em desenvolver a classificação, delimitação e extração de vegetação é disponibilizar informações relevantes à comunidade, visando o manejo e a preservação de recursos. Como destacam Bretz, Akbari e Rosenfeld (1998) e Abreu (2008), diversas pesquisas têm apontado os benefícios das árvores em regiões urbanas, por funcionarem como termorreguladoras naturais capazes de melhorar o conforto térmico e fisiológico dos indivíduos presentes.

As árvores contribuem significativamente no processo de resfriamento das cidades e na conservação de energia e podem fornecer proteção solar às edificações, enquanto a evapotranspiração pode reduzir a temperatura. Além de absorverem o som, a água das chuvas e filtrarem poluentes, reduzem a velocidade do ar e estabilizam o solo ao impedir erosão (ABREU, 2008).

Neste contexto, pretende-se neste trabalho explorar dados lidar com o propósito de extrair indivíduos arbóreos e aglomerados, considerando um ambiente urbano com a presença de vegetação de espécies diferentes e distribuição não regular, bem como algumas informações acerca desta vegetação. Para isto, a metodologia proposta apresenta a utilização dos dados distribuídos de forma irregular e ordenados em função de suas alturas, em concordância com Véga et al. (2014). Contudo, a proposta se diferencia das demais pesquisas por utilizar polígonos convexos no processo de extração das árvores individuais e aglomerados.

1.6 Estrutura do trabalho

Este trabalho está estruturado em seis capítulos que buscam apresentar o conteúdo estudado e os resultados obtidos. No primeiro capítulo é contextualizado e apresentado o estado da arte, a hipótese, bem como os objetivos.

O segundo capítulo apresenta a fundamentação teórica utilizada para o desenvolvimento do presente documento. Os temas abordados são: Sistema de varredura a LASER, estimativa de variáveis dendrométricas, estrutura de dados tridimensionais e métodos de análise de qualidade.

O terceiro capítulo indica as áreas de estudo selecionadas, os materiais e *softwares* utilizados. Além disso, neste capítulo é feita a descrição do método utilizado no processo de extração de indivíduos arbóreos a partir de dados lidar tridimensionais.

O quarto capítulo apresenta os resultados obtidos pelas etapas de processamento e pós-processamento. Estes são apresentados de acordo com as áreas de estudos utilizadas, bem como considerando a detecção de indivíduos e aglomerados.

No quinto capítulo é apresentada uma discussão e análise dos resultados obtidos, bem como uma síntese dos resultados, considerando todas as áreas de estudo consideradas. Por fim, no sexto capítulo são apresentadas as conclusões e recomendações.

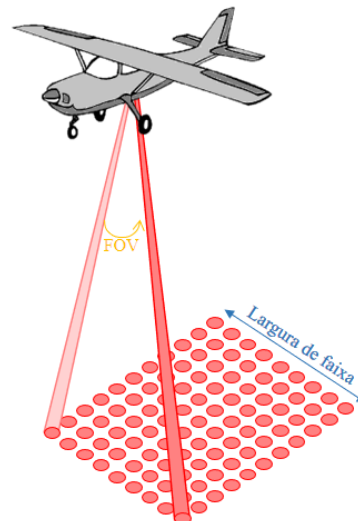
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentados os conceitos fundamentais para entendimento dos processos de aquisição de dados lidar, bem como do procedimento de detecção e extração de indivíduos arbóreos e/ou aglomerados e estimativa de suas variáveis dendrométricas.

2.1 Sistema de varredura à LASER aerotransportado

O sistema lidar tem por característica a medição de distâncias entre dois pontos, ou seja, o emissor e o alvo. Para isso, um feixe de luz LASER altamente colimado e com campo de visada instantânea (IFOV) pequeno é emitido em direção ao alvo e por meio da determinação do tempo decorrido entre a emissão e recepção do feixe, e conhecendo-se a velocidade de propagação do pulso, infere-se a distância. Uma vez que o campo de visada instantânea do sistema LASER seja pequeno, são necessárias diversas linhas de voo de modo a cobrir toda uma área de interesse (Figura 2).

Figura 2 - Coleta da nuvem de pontos com sistema de varredura



Fonte: Autor (2017)

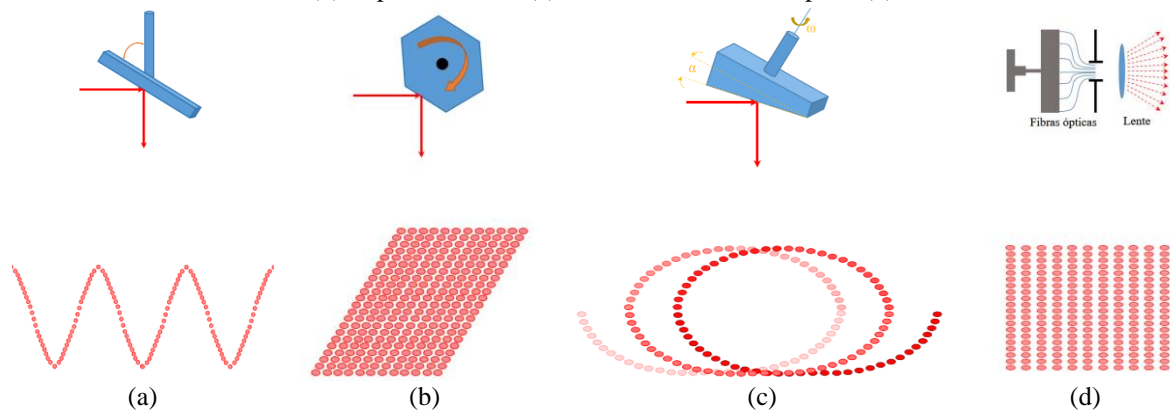
Deste modo, os sistemas de aquisição de dados lidar contam com um sistema de varredura, cuja largura da faixa varrida (L) é dada em função do ângulo de abertura ou campo de visada (FOV) e da altura de voo (h) entre o emissor e alvo, conforme Equação (1). A determinação da largura da faixa (L) é feita no planejamento do voo, de modo a otimizar a aquisição da nuvem de pontos com o menor número de linhas de voo possível. Para isso pode-

se utilizar a Equação (1) que proporciona uma estimativa de L da para o caso em que se tem um terreno idealmente plano.

$$L = 2 \cdot h \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{FOV}{2} \right) \quad (1)$$

Diferentes sistemas de varredura podem ser utilizados. Estes sistemas são compostos por conjuntos de espelhos que por meio de um sistema de rotação promovem uma varredura da área sobrevoada, permitindo assim ampliar a quantidade de pontos obtidos transversalmente à linha de voo. Em função do sistema de varredura considerado por cada fabricante, diferentes padrões de varredura são possíveis, como mostra a Figura 3.

Figura 3 - Exemplo de sistemas de varredura e seus respectivos padrões. Espelho oscilante (a), polígono rotativo (b), espelho nutante (c) e comutador de fibra óptica (d)



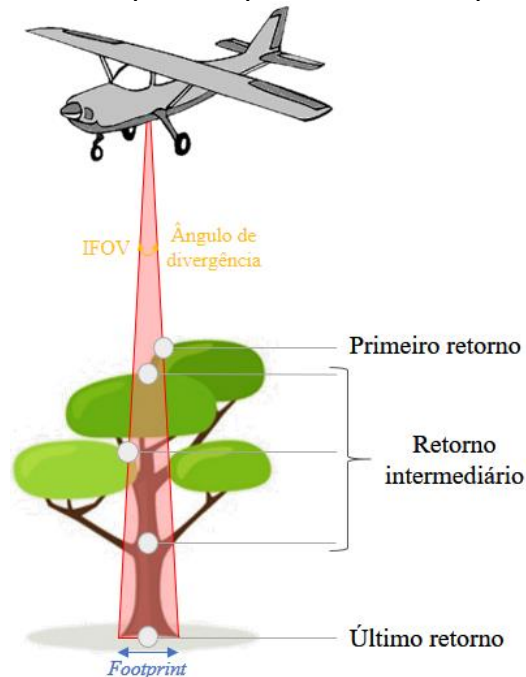
Fonte: Produzido pelo autor (2017) adaptado de Wehr e Lohr (1999)

Estes padrões são definidos em função do mecanismo de varredura utilizado no sistema. Além disso, os padrões de varredura permitem recobrir a superfície varrida de forma completa, com ou sem revisita de uma mesma área ao longo da linha de voo, caso do espelho nutante e do polígono rotativo, respectivamente. Já o sistema de varredura por fibras ópticas utiliza um conjunto de sistemas de lentes com a finalidade de divergir o feixe emitido, de forma controlada, gerando assim padrões homogêneos quanto ao afastamento dos pontos.

O pulso LASER é emitido para os alvos através de uma abertura na base da aeronave e, de acordo com Axelsson (1998), uma única emissão pode resultar na determinação de mais de uma medida de distância, resultando assim na coleta de mais de um ponto no espaço objeto. Isso se deve ao fato de que, mesmo sendo altamente colimado, o pulso LASER possui um ângulo de divergência sólido. Esta divergência resulta em um maior “ponto” projetado no solo, denominado *footprint*. Uma vez que o pulso LASER pode atingir parcialmente um alvo, como: galhos, folhas, fios de alta tensão, por exemplo, parte da energia é retornada ao sensor,

enquanto que a parte que não sofreu interação continua seu percurso até atingir o alvo final. Este processo de reflexão parcial é denominado efeito de múltiplos ecos, como ilustra a Figura 4. Quando os alvos intermediários são vegetações, o processo de múltiplos retornos, inerente ao pulso LASER, sofre influência da densidade e das características verticais da vegetação sobrevoada. Para os casos em que as árvores apresentem copas altamente densificadas por galhos e folhas, é possível que alguns pulsos não atinjam o solo.

Figura 4 - Reflexão parcial do pulso LASER e múltiplos retornos.



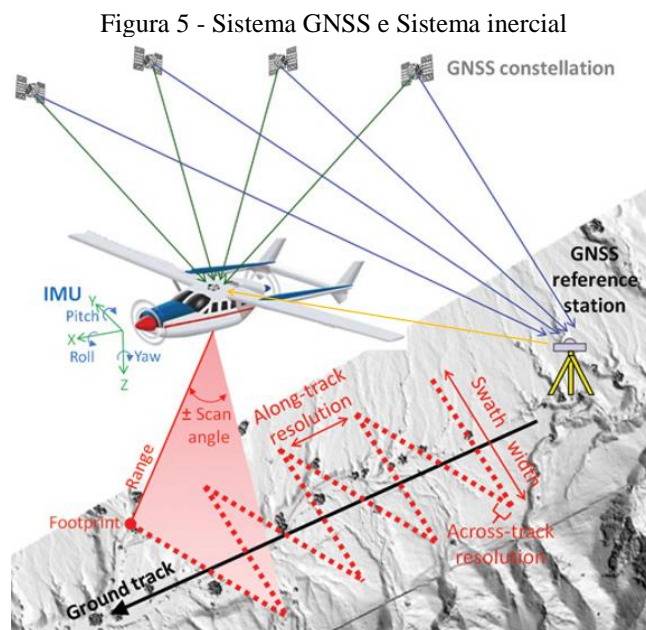
Fonte: Produzido pelo autor (2017) adaptado a partir de Fernandez-Diaz (2014)

Assim, os retornos resultantes da emissão dos pulsos podem ser divididos em três categorias: primeiro retorno, retornos intermediários, e último retorno. Todavia, o número de retornos intermediários que podem ser obtidos limita-se à capacidade de registro do equipamento utilizado. Usualmente, para maioria das aplicações são utilizadas somente as observáveis obtidas pelo primeiro e último retorno. Todavia, a utilização dos retornos intermediários no processo de modelagem de copas de vegetação é apresentada como uma das vantagens dos dados lidar quando comparados com a Fotogrametria tradicional, permitindo assim, a modelagem de indivíduos que estejam abaixo da camada mais superficial, como o sub-bosque, por exemplo (TITTMANN et al., 2011; VÉGA et al., 2014).

Sabe-se, porém, que, diferente dos sistemas fotogramétricos, o sistema lidar não apresenta redundância de observação, de um mesmo ponto, como a sobreposição longitudinal na Fotogrametria. Sendo assim, a qualidade dos dados obtidos está diretamente

relacionada à precisão e confiabilidade dos parâmetros de calibração dos diferentes componentes do sistema de varredura LASER (EL-SHEIMY et al., 2005).

Para o Sensoriamento Remoto, o sistema lidar torna-se uma ferramenta poderosa de aquisição de dados quando combinado com técnicas GNSS e com sistemas inerciais (INS), sendo estes essenciais para a operação de sistemas de varredura a LASER, uma vez que permitem o georreferenciamento dos pontos gerados por este sistema (FERNANDEZ-DIAZ, 2011). O GNSS é responsável por fornecer dados que, quando processados, resultam nas coordenadas planimétricas (E, N), bem como a altitude geométrica (h), do sensor, com relação a um sistema referência. Já o sistema inercial é responsável pelo registro da atitude da aeronave, ou seja, dos ângulos de rotação em torno de cada um dos eixos do sistema cartesiano, ver Figura 5.

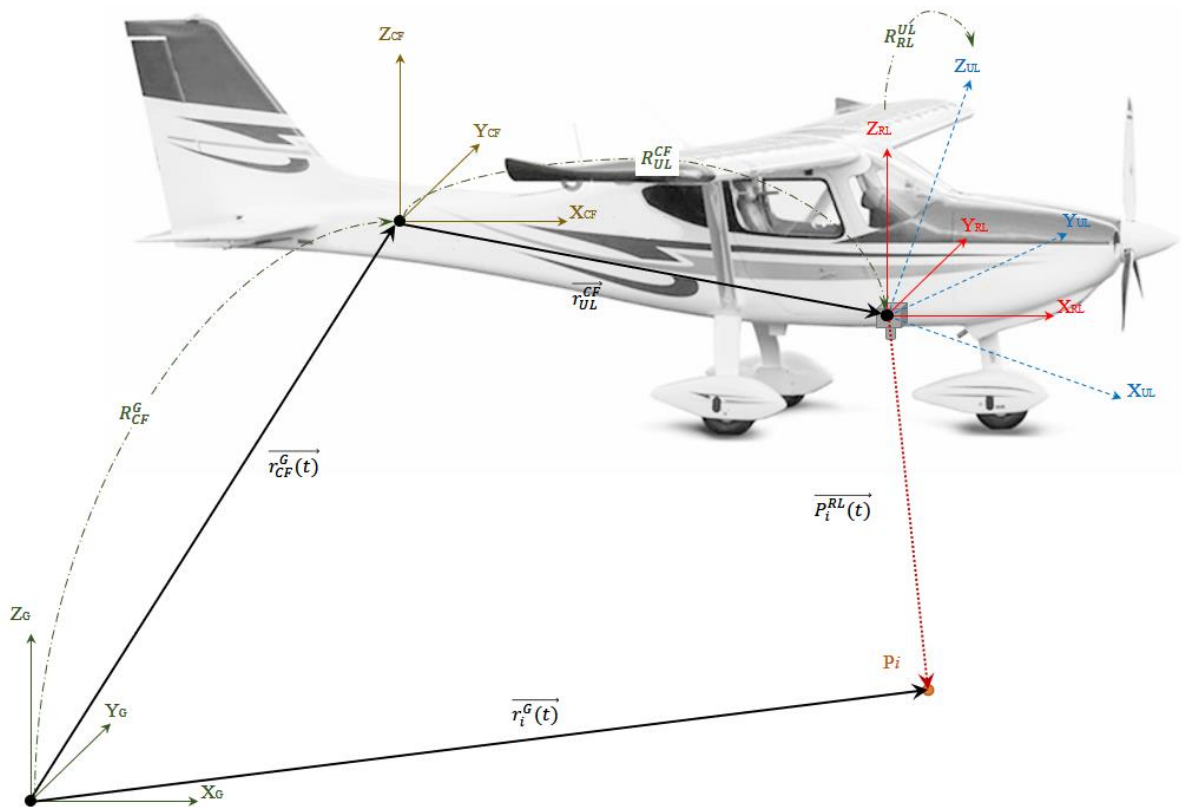


Fonte: Adaptado e modificado de Fernandez-Diaz (2011)

Como pôde-se notar na Figura 5, e segundo Wehr (2008), o sistema utiliza-se da técnica *Differential Global Positioning System* (dGPS), proporcionando assim acurácia em torno de centímetros na determinação da posição. Conforme Monico (2008), o dGPS é o processo de redução de efeitos da disponibilidade seletiva do GNSS, melhorando assim a acurácia e mantendo a integridade do sinal GNSS. Na sua utilização, faz-se necessário o uso de uma estação base com coordenadas conhecidas. O método apresenta duas possíveis formas de correção: considerando a correção em coordenadas determinadas pelo rastreamento da base ou pela correção da pseudodistância, técnica mais empregada em virtude da correção se aplicar somente aos satélites compartilhados pela estação base e o receptor localizado na aeronave durante a missão.

As coordenadas dos pontos que compõem a nuvem de pontos podem ser obtidas a partir do conhecimento da geometria que envolve os diversos sensores e o ponto situado na superfície de referência. Esta geometria é apresentada na Figura 6, onde é possível perceber que os sistemas GNSS/INS não são coincidentes com o sistema de varredura lidar, e que, além deles, os sistemas de emissão LASER e a unidade de produção do sinal também não são.

Figura 6 - Sistemas envolvidos na aquisição de dados lidar



Fonte: Adaptado e modificado de El-Sheimy et al. (2005)

Nesta figura podem ser observados diferentes sistemas de referência, bem como diferentes vetores e matrizes de rotação que relacionam estes vetores. Na sequência são descritos estes elementos:

- $\overrightarrow{r_{CF}^G(t)}$ – é o vetor de coordenadas no espaço do centro de fase da antena GNSS;
- $\overrightarrow{r_{UL}^{CF}}$ – é a translação entre o centro de fase da antena GNSS e da unidade LASER;
- $\overrightarrow{r_i^G(t)}$ – é o vetor posição do ponto P_i – a ser determinado;

$\overrightarrow{P_i^{RL}}(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -d_i(t) \end{bmatrix}$ – é a posição de um ponto i no terreno, considerando o referencial do raio LASER, sendo $d_i(t)$ a distância entre o emissor e o alvo num instante t ;

R_{CF}^G – é a matriz de rotação entre o sistema de referência e o sistema GNSS/INS;

R_{UL}^{CF} – é a matriz de rotação entre os sistemas GNSS/INS e a unidade LASER;

R_{RL}^{UL} – é a matriz rotação entre unidade LASER e raio LASER.

Com base no que foi apresentado, El-Sheimy et al. (2005) estabelecem a relação geométrica envolvendo a posição do ponto P_i e a geometria constituída pelos diversos elementos presentes na Equação (2).

$$\overrightarrow{r_i^G}(t) = \overrightarrow{r_{CF}^G}(t) + R_{CF}^G \cdot R_{UL}^{CF} \cdot \overrightarrow{r_{UL}^{CF}} + R_{CF}^G \cdot R_{UL}^{CF} \cdot R_{RL}^{UL} \cdot \overrightarrow{P_i^{RL}}(t) \quad (2)$$

De acordo com El-Sheimy et al. (2005), os erros inerentes à equação apresentada podem ser provindos de diferentes fontes:

I. Erros nos parâmetros de georreferenciamento proveniente dos sistemas GNSS/IMU;

II. Erros de translação e rotação entre os diversos sensores que compõem o sistema lidar. Usualmente, estes erros são denominados parâmetros de *bore-sighting* e *lever arm*, sendo determinados por procedimentos de calibração;

III. Erros na medição da distância $\overrightarrow{P_i^{RL}}(t)$;

IV. Erro na relação angular entre a unidade LASER e o raio LASER; e

V. Erros sistemáticos devido ao não sincronismo dos sistemas, usualmente determinados durante o processo de calibração do sistema.

2.2 Estimativa de variáveis dendrométricas por meio de dados lidar

Segundo Encinas, Silva e Ticchetti (2002), a palavra dendrometria deriva do grego e pode ser entendida como a realização de medidas nas árvores. Medidas dendrométricas são necessárias quando se pretende realizar atividades como manejo florestal, exploração madeireira, estabelecimento de políticas florestais, dentre outros. Ainda de acordo com os

autores, a dendrometria teve sua origem moldada na necessidade de estimativa e quantificação dos recursos florestais, de modo a impulsionar o desenvolvimento do setor florestal, sem afetar o meio ambiente e os contextos florestais envolvidos. Nela objetiva-se a medição de grandezas relativas às árvores e para fins dendrométricos, as árvores podem ser classificadas em três tipos: coníferas, latifoliada e palmeiras. Segundo os autores, árvores latifoliadas (que apresentem folhas largas e grandes) são mais predominantes. Além da dendrometria, tem-se a dasometria. Também conhecida como inventário florestal, a dasometria objetiva a aferição de agrupamentos de árvores, ou seja, preocupa-se com o coletivo, buscando apurar o número de indivíduos arbóreos em uma determinada área, por exemplo.

De acordo com Gomes (1957), o diâmetro ou a circunferência do tronco são medidas fundamentais para o desenvolvimento de estimativas dendrométricas como área basal, volume, crescimento, entre outras. Usualmente, medidas de diâmetro de tronco são realizadas em alturas padronizadas denominadas “altura do peito” ou DAP. O valor utilizado para realizar o DAP pode variar de local para local, sendo realizada no Brasil, a 1,30 m sobre o nível do solo. Todavia, esta altura pode sofrer variação em função de características físicas do tronco, como troncos bifurcados, deformações e outras. Outra variável dendrométrica relacionada ao DAP é denominada “área basal”, sendo é estimada a partir da área da circunferência formada pelo corte transversal ao tronco na altura do peito, projetada ao solo. A utilização de dados lidar terrestres, como forma de estimativa do DAP, se mostra como uma alternativa rápida e confiável. Centeno, Mitishita e Machado (2014) apresentam um estudo de reconstrução de troncos de araucárias por um conjunto de pontos 3D, coletados por um sistema lidar terrestre, tornando possível, assim, estimar o diâmetro do tronco e sua área basal de forma indireta. A tarefa de estimar ambas variáveis dendrométricas por dados aéreos encontra problemas dependendo da densidade foliar da copa, uma vez que em copas com folhagem densa o pulso LASER pode não apresentar penetração na vegetação. Além disso, não é possível garantir que sejam amostrados pontos sobre os troncos, de modo que seja possível estimar diretamente o DAP.

Conforme Van Laar e Akça (2007), a altura da árvore é uma variável dendrométrica fundamental na determinação do volume da árvore em pé. De acordo com os autores, a altura total da árvore é definida como a distância entre o topo e a base da árvore, medida de forma perpendicular a partir do topo. Desta forma, em casos onde a árvore apresente alguma inclinação, a altura do tronco e o comprimento do tronco podem não ser iguais. Além desta, têm-se também a altura da copa que se dá por meio da subtração da altura do fuste na altura do indivíduo arbóreo. Diversos autores propõem a determinação da altura dos indivíduos

arbóreos, como já apresentado na Seção 1.2, pelas mais variadas técnicas. Entretanto, é válido ressaltar o pioneirismo de Aldred e Bonnor (1985) na utilização de perfis de altura obtidos por dados lidar no processo de estimativa de altura de indivíduos arbóreos.

Segundo Encinas, Silva e Ticchetti (2002), a estimativa do diâmetro da copa é realizada por meio da projeção da mesma no solo. Muitas vezes a estimativa pode requerer mais de uma medida, devido a forma não circular da copa. É recomendado que pelo menos duas medidas sejam realizadas, considerando o eixo de maior comprimento e seu ortogonal. Ainda conforme os autores, não existe uma correlação direta entre o tamanho da copa de uma determinada árvore e outras da mesma espécie em um mesmo ambiente. Isto se deve ao grau de esbeltez, ou seja, da influência que o espaço disponível para crescimento tem sobre o processo de crescimento da copa. Por esta razão, é esperado que árvores dominantes apresentem copas maiores que árvores dominadas. A estimativa de copas dominantes é realizável por técnicas de Sensoriamento Remoto e vem sendo desenvolvida há muitos anos. Já a estimativa de copa sub-bosque pôde ser explorada com a inserção de técnicas aplicadas aos dados obtidos pelo perfilamento LASER, uma vez que por meio de perfis de altura é possível detectar indivíduos arbóreos que estejam abaixo da copa principal, como apresentado por Duncanson et al. (2014).

Van Laar e Akça (2007) indicam que uma medida mais confiável do diâmetro da copa é obtida ao utilizar oito medidas no entorno da copa. Além disso, os autores propõem uma formulação para o cálculo de área da superfície externa da copa de coníferas parabólicas, dada em função do comprimento e da largura da copa, enquanto que o volume da copa é estimado em função do raio médio e comprimento da copa.

2.3 Estrutura de dados

Esta seção apresenta as principais formas de estruturação de dados utilizadas no processo de extração de indivíduos arbóreos a partir de dados lidar.

2.3.1 Rede de triângulos irregulares

De acordo com Peucker et al. (1978), a principal motivação em realizar o estudo que resultou na criação do conceito de *Triangulated Irregular Network* (TIN) surgiu dos problemas em representar o terreno por meio das técnicas tradicionais empregadas, uma vez

que a superfície topográfica não é uma superfície estática, ou seja, não previsível, homogênea ou padronizada. A representação por meio de malha regular, embora mais simples computacionalmente, pode resultar em áreas com amostragem insuficiente (área com muita irregularidade) e outras superamostradas, como por exemplo em áreas planas.

Peucker et al. (1976) apresentam um estudo sobre a estrutura de dados utilizados em cartografia, com ênfase no TIN. Consoante aos autores, o TIN possui a vantagem de utilizar um menor número de pontos para representar feições planas, enquanto que em regiões de maior complexidade a densidade de pontos é incrementada de modo a representá-la com maior detalhamento possível. Ainda em conformidade com os autores, uma boa triangulação deve ser a que melhor represente uma determinada superfície com uma quantidade mínima de armazenamento.

Segundo os mesmos autores, na maioria das aplicações que envolvem a utilização de TIN, algumas operações básicas devem ser realizadas, sendo elas: (1) Ordenação dos elementos por elementos processados, (2) Processo de busca, por pontos ou nós e (3) Intersecção da superfície do terreno com várias outras feições baseado em linhas de intersecção. Com base nestes três processos, os autores exemplificam aplicações que os utilizem como, por exemplo, a geração de mapas de sombreamento e de inclinação onde a utilização de triângulos proporciona um ganho no processamento, uma vez que a busca dos vizinhos se dá pelos pontos que definem o triângulo, considerando a conectividade entre eles.

2.3.2 *Modelo de altura de copa*

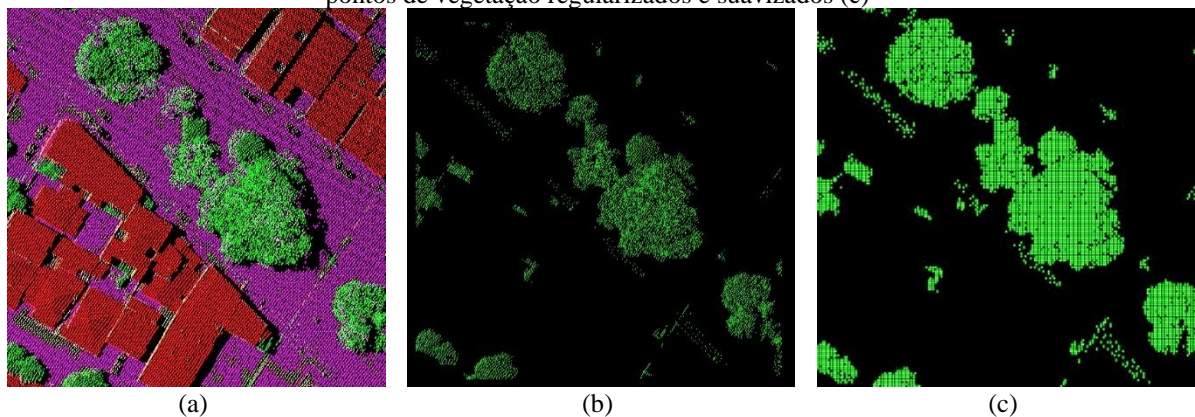
Diversos modelos de elevação são utilizados em cartografia, um deles é o modelo de altura de copa, conhecido em inglês pelo acrônimo CHM (*Canopy Height Model*). O CHM pode ser criado de forma semelhante a um MDS normalizado, onde a altitude dos pontos se dá pela subtração da elevação dos pontos do MDS em relação a um MDT interpolado (ST-ONGE, 1999). Entretanto, o CHM utiliza somente pontos que caracterizem vegetações e, desta forma, uma seleção dos pontos utilizados no processo de geração do mesmo é fundamental, de modo a utilizar uma nuvem de pontos compostas somente por pontos amostrados sobre vegetação (ver Figura 7 (b)).

Ao final do processo de geração do CHM tem-se os pontos pertencentes a vegetação com suas respectivas posições planimétricas regularizadas e suas alturas filtradas (Figura 7 (c)). Contudo, o processo de subtração dos pontos de solo pode introduzir

deformações na estrutura da copa dos indivíduos arbóreos. Véga et al. (2014) sugerem que o processo de normalização seja feito localmente, buscando-se o ponto de solo mais próximo ao ponto de máximo dos indivíduos ou aglomerados, com o intuito de minimizar ou anular a deformação sofrida no processo.

Usualmente, o CHM é apresentado em um formato regular, obtido a partir da interpolação da amostra original, que pode ser realizada por diferentes métodos: vizinho mais próximo, interpolação bi-linear, krigagem, dentre outros (POPESCU e WYNNE, 2004). Contudo, o processo de interpolação pode não apresentar um resultado suave e completo, onde os indivíduos não apresentem falhas na sua copa. Isto se deve ao fato dos pontos imageados pelos sensores serem irregulares, quanto a amostragem, e a interpolação não ser capaz de preencher todas as falhas presentes na representação da copa. Assim, diversos autores, como Brandtberg et al. (2003); Martins et al. (2007); Jing et al. (2012); Mongus e Žalik (2015), utilizam uma etapa de pós-processamento, onde filtros de suavização e remoção de ruídos, como média e gaussiano, são aplicados ao CHM, com o objetivo de remover pontos espúrios e completar possíveis lacunas que o indivíduo arbóreo possa apresentar.

Figura 7 - Etapa de criação do CHM. Pontos classificados (a), pontos de vegetação normalizados e filtrados (b), pontos de vegetação regularizados e suavizados (c)



Fonte: Autor (2017)

2.3.3 *Voxel*

Voxel é a abreviatura de “elemento de volume” ou “célula de volume”. Cada *voxel* é uma unidade volumétrica e possui um valor numérico associado a ele que representa alguma propriedade de medida ou variáveis independentes de um objeto real ou fenômeno, como cor, opacidade, densidade, intensidade, altura, entre outros (KAUFMAN, 1990).

De acordo com Kaufman, Cohen e Yagel (1993), um *voxel* é uma unidade cúbica de volume centralizada em um ponto de uma malha regular. Por ser uma unidade de volume, o *voxel* pode ser comparado a versão 3D de um pixel 2D que apresenta uma unidade de área. O espaço entre duas unidades *voxel* não é representado em um conjunto de dados de *voxel*. Dependendo do tipo de dado armazenado no *voxel* e da finalidade do mesmo, as informações entre dois elementos podem ser reconstruídas e/ou aproximadas por um processo de interpolação, por exemplo.

Gráficos volumétricos oferecem os mesmos benefícios que gráficos de superfície, além de apresentar outras vantagens devido à dissociação da unidade e uniformidade. Quando utilizado com dados tridimensionais, como, por exemplo, dados médicos obtidos por *scanners*, simulações científicas, como em dinâmica de fluídos, o *voxel* se apresenta como uma alternativa excelente na representação dos mesmos.

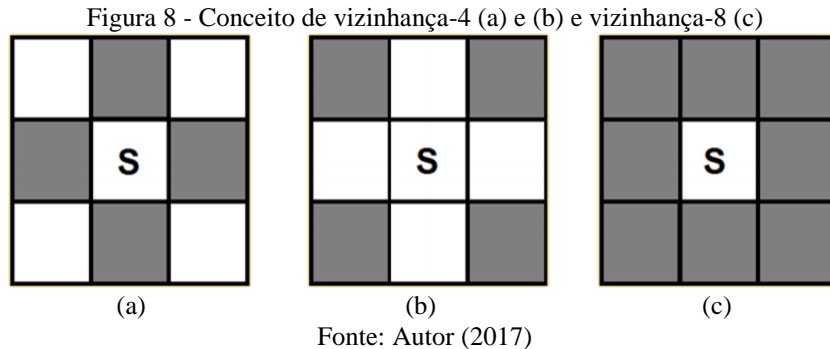
2.4 Crescimento de região

Conforme apresentado em Zucker (1976), o crescimento de regiões em imagens pode ser entendido como a divisão de uma imagem A em sub-regiões homogêneas A_1, A_2, \dots, A_N , regiões estas formadas pela adoção de algum critério de homogeneidade H . Sobre as regiões formadas, exige-se como condição:

- I. As regiões (A_1, A_2, \dots, A_N) devem ser compostas por um conjunto de pontos contíguos;
- II. A união das regiões (A_1, A_2, \dots, A_N) deve ser uniforme e resultar novamente em A , matematicamente pode se dizer que $\bigcup_{i=1}^N A_i = A$;
- III. Todas as regiões (A_1, A_2, \dots, A_N) devem ser distintas e separadas, ou seja, $A_i \cap A_j = \emptyset$ para todo $i \neq j$.
- IV. O critério de homogeneidade adotado deve ser satisfeito para cada uma das regiões, ou seja, $H(A_i) = \text{verdadeiro}$. Além disso, regiões adjacentes não devem apresentar homogeneidade similar, ou seja, $H(A_i \cup A_j) = \text{falsa}$.

Em geral, todo algoritmo de crescimento de regiões inicia-se com pontos sementes, sendo que estes podem ser selecionados de forma automática ou não. Pontos sementes podem ser entendidos como pontos iniciais usados no processo de segmentação, sendo a partir destes que as regiões homogêneas (A_1, A_2, \dots, A_N) de A serão obtidas. A seguir,

a busca por vizinhos que atendam o padrão de homogeneidade definido é iniciada podendo ser realizada por meio de dois padrões de vizinhança: vizinhança-4 e vizinhança-8, Figura 8 (a, b) e (c), respectivamente.



Para dados lidar, porém, este padrão de crescimento não é previamente possível, visto que, por não se tratar de uma imagem, e sim de uma nuvem de pontos irregular (TIN), os pontos não se distribuem de forma regular como em uma imagem. Desta forma, dependendo do tipo de aplicação que será realizada, é necessário que se faça, em uma etapa intermediária, a conversão do mesmo para uma malha regular, definindo um procedimento de interpolação (vizinho mais próximo, interpolação bi-linear, dentre outros). Todavia, é possível implementar o processo de crescimento de região em pontos irregularmente espaçados, como feito por Lee et al. (2010) e Li et al. (2012). Para sua realização, contudo, é necessário estruturar o processo de crescimento com limiares que determinem a distância máxima a ser utilizada na etapa de crescimento de cada segmento, adicionando-se sempre os pontos mais próximos à lista de pontos que a semente deu origem; além de definir o sentido dos testes a serem realizados.

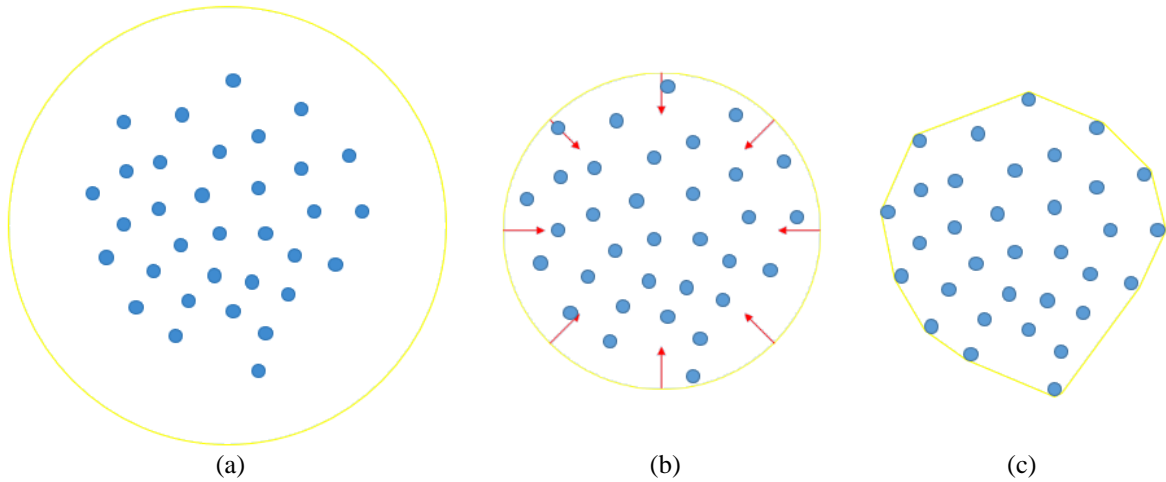
2.5 Polígono convexo

De acordo com De Berg et al. (2000), um dos primeiros problemas geométricos estudados em geometria computacional foi o desenvolvimento de cascos convexos, do inglês, *convex hull*. Sabe-se que uma subamostra S será dita convexa se todas as conexões de todos os pontos interiores a ela também estiverem interiores a S . Desta forma, De Berg et al. (2000) definem como casco convexo $CC(S)$ de S como a menor amostra convexa que contenha S .

Ainda segundo os autores, um casco convexo pode ser visualizado como sendo um elástico colocado em torno de um conjunto de pregos presos a uma superfície plana, onde os pregos representariam os pontos (ver Figura 9). Nesta situação, o elástico assumiria a

menor distância entre os pontos, garantindo que toda a amostra fosse interior a ele, como na Figura 9 (c).

Figura 9 - Definição de um polígono convexo



Fonte: Adaptado de De Berg et al. (2000)

A partir desse exemplo, De Berg et al. (2000) apresentam a definição de casco convexo: “Dado um conjunto finito de pontos S , o casco convexo deste conjunto é representado por um polígono convexo, onde seus vértices são pontos que pertencem a S , e os demais pontos estejam interiores ao polígono”.

Sabe-se que, um polígono convexo apresentar-se-á, na maioria das vezes, de forma irregular. De acordo com Braden (1986), um polígono convexo pode ter sua área calculada por meio de uma subdivisão do polígono original em triângulos, que teriam suas áreas facilmente calculadas. Contudo, o autor sugere a utilização dos vértices do polígono como melhor opção no cálculo, uma vez que, desta forma, o Método de Gauss para cálculo de áreas para polígonos irregulares poderia ser utilizada (Equação (3)). A mesma relaciona todos os n pontos pertencentes ao polígono convexo, obtendo sua área por meio das coordenadas dos vértices. Vale ressaltar que o método é desenvolvido considerando os vértices do polígono ordenados em um sentido anti-horário, a partir de um ponto origem qualquer.

$$A = \frac{1}{2} \left[x_1(y_n - y_2) + \sum_{i=2}^{n-1} x_i(y_{i-1} - y_{i+1}) + x_n(y_{n-1} - y_1) \right] \quad (3)$$

2.6 Análise de qualidade

De acordo com a ISO 19157 (2013), indicadores de qualidade dos dados são componentes que podem descrever aspectos qualitativos de dados geográficos. Ainda de acordo com a ISO, estes indicadores podem ser classificados em: completeza, acurácia posicional, consistência lógica, acurácia temática e qualidade temporal. Neste contexto, a completeza é definida como a presença ou ausência de algum objeto ou feição, no espaço estudado; acurácia posicional se refere à acurácia na determinação da posição de uma feição em um dado sistema de referência; consistência lógica é o grau de aderência de regras lógicas a uma dada estrutura de dados, atributos e relações; e qualidade temporal está relacionada a frequência de ocorrência de dada feição, objeto ou levantamento. Como pode-se perceber, são diversos os indicadores que podem ser usados e, deste modo, é comum perceber divergências na denominação das nomenclaturas entre diferentes autores, como é possível ver no Quadro 2.

Quadro 2 - Nomenclatura de alguns dos indicadores de qualidade

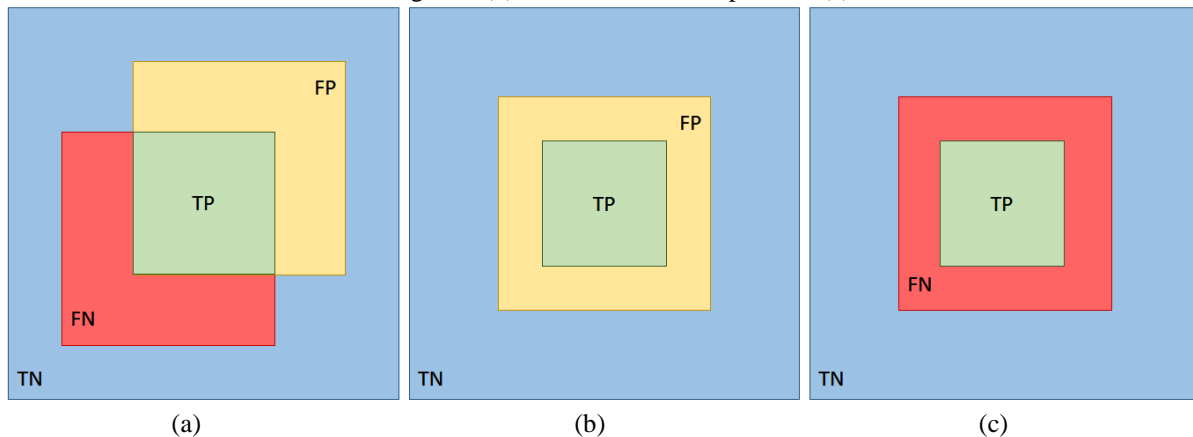
ISO 19157	Wiedemann et al. (1998)	Véga et al. (2014)	Lu et al. (2014)	Mongus e Žalik (2015)
Acurácia temática	Correteza	Precisão	Precisão	Precisão
Completeza	Completeza	Índice de detecção	<i>Recall</i>	<i>Recall</i>
-	Qualidade	<i>F-Score</i>	<i>F-Score</i>	<i>F1-Score</i>

Fonte: Autor (2017)

Mesmo com as diferentes nomenclaturas, alguns indicadores possuem a mesma formulação matemática, como, por exemplo, os indicadores de acurácia temática e completeza que, de acordo com Wiedemann et al. (1998), podem ser obtidos por meio da matriz de confusão que correlacionaria os elementos classificados pelo segmentador com a verdade terrestre.

A matriz de confusão é composta por quatro elementos, quando classificados de forma binária (vegetação e não vegetação). Tais elementos podem ser denominados por: (i) Verdadeiro positivo (TP), que são todas as feições que existem na amostra de referência e foram identificados; (ii) Verdadeiro negativo (TN), que são as feições que não são de interesse e mesmo assim foram identificadas; (iii) Falso positivo (FP) ou erro de comissão, que são objetos que foram classificados como objeto de interesse, mas não são; e (iv) Falso negativo (FN) ou erro de omissão, que correspondem a objetos que deveriam ter sido classificados como objeto de interesse, mas não foram. A Figura 10, baseada em Galo (2017), mostra, de modo gráfico e por meio de três exemplos, os elementos anteriormente apresentados.

Figura 10 - Elementos da matriz confusão: Presença de todos os elementos – TP, FP, TN e FN (a), ausência de falso negativo (b) e ausência de falso positivo (c)



Fonte: Produzido pelo autor, baseado em Galo (2017)

O caso exemplificado na Figura 10 (a) demonstra uma situação onde todos os quatro elementos da matriz de confusão ocorrem. Desta forma, o processo resultou em objetos que foram omitidos (FN) da amostra existente; objetos que foram corretamente selecionados (TP) e não selecionados (TN); e objetos que não deveriam ser considerados como de interesse, mas foram (FP).

Os dados apresentados na Figura 10 (b) e (c), são casos opostos. Em (b), todos os objetos de interesse foram selecionados, resultando assim em um erro de omissão nulo. Contudo, alguns objetos que não são de interesse também foram selecionados como sendo, ocorrendo erro de comissão. Já em (c), nenhum objeto que não é de interesse foi selecionado como sendo, porém, alguns elementos de interesse não foram selecionados, resultando então em um erro de omissão.

A acurácia temática (Equação (4)), denominada por Wiedemann et al. (1998) como *correctness*, busca relacionar o número de indivíduos que foram corretamente selecionados, uma vez que, faz uso do erro de comissão. Ela representa o percentual de feições corretamente extraídas, ou seja, no caso deste trabalho, quanto dos indivíduos arbóreos do dado de referência, foram selecionados de forma correta, excluído os falsos indivíduos.

$$\text{Acurácia temática} = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FP}} \quad (4)$$

Já a completeza (Equação (5)), também denominada como *completeness* ou *recall*, pode ser entendida como a razão entre o número de elementos extraídos de forma correta (TP) pelo número de elementos que são da referência.

$$\text{Completeza} \approx \frac{TP}{TP + FN} \quad (5)$$

Embora uma avaliação geral sobre o conjunto de dados seja frequentemente realizada, um termo em específico para esta avaliação não é apresentada pela ISO. Além disso, diversos autores propõem a avaliação do segmentador, somente por meio dos resultados deste indicador. Como dito anteriormente, a formulação matemática pode divergir quando se trata deste indicador em específico. Wiedemann et al. (1998) fazem uso da denominação “Qualidade” e apresentam a Equação (6). Ene, Næsset e Gobakken (2012) denominam o indicador de qualidade geral como “Índice de acurácia” (Equação (7)). Li et al. (2012), Véga et al. (2014) e Lu et al. (2014) utilizam a denominação “*F-Score*” (Equação (8)), enquanto que Mongus e Žalik (2015) denominam “*FI-Score*” a mesma formulação matemática. A rigor, o indicador *F-Score* pode ser obtido a partir da média harmônica da acurácia temática e da completeza.

$$\text{Qualidade} = \frac{TP}{TP + FN + FP} \quad (6)$$

$$\text{Índice de acurácia} = \left[1 - \frac{FP + FN}{TP} \right] \quad (7)$$

$$F - \text{Score} = \frac{2 * TP}{2 * TP + FP + FN} \quad (8)$$

A utilização de diferentes indicadores de qualidade geral pode alterar a percepção do leitor, uma vez que a formulação matemática implica em diferentes resultados, melhores ou piores. Em uma situação hipotética, onde os valores de elementos de qualidade seriam 100, 20 e 30 para elementos corretamente selecionados (TP), erros de omissão (FN) e comissão (FP), respectivamente; os resultados obtidos seriam 67%, 50% e 80% para as Equações (6), (7) e (8), respectivamente. Apesar de apresentar um resultado mais suscetível a demonstração de sucesso na segmentação, a formulação apresentada pela Equação (8) aparece como a mais utilizada no processo de avaliação de qualidade de segmentadores de árvores. Por esta razão, adotou-se nesta dissertação este indicador para a avaliação de qualidade do segmentador proposto.

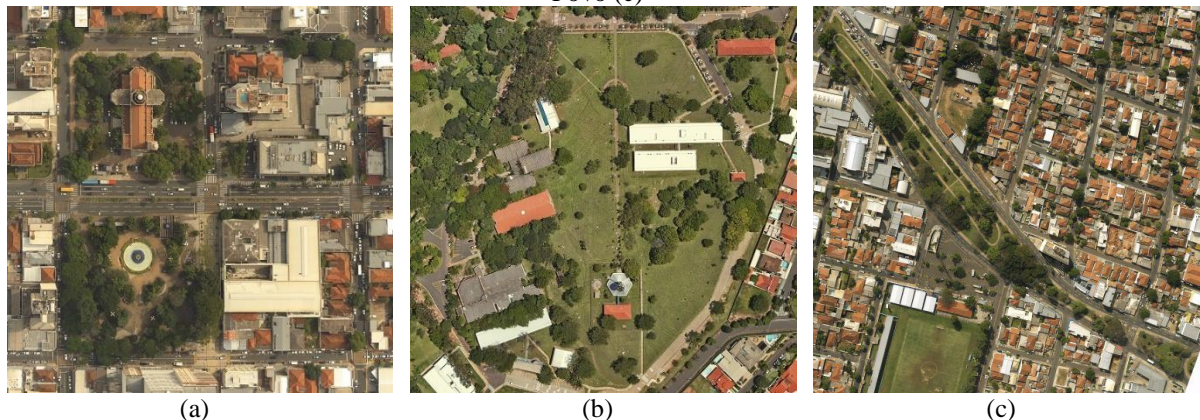
3 MATERIAL E MÉTODO

Esta seção busca apresentar a área de estudo selecionada (Seção 3.1), bem como os materiais utilizados neste trabalho (Seção 3.2). Além disso, a metodologia adotada no processo de segmentação de árvores heterogêneas é introduzida (Seção 3.3) de modo a proporcionar o entendimento dos processos adotados.

3.1 Áreas de estudo

Foram selecionadas três áreas testes, todas pertencentes à área urbana de Presidente Prudente. Neste processo, optou-se por escolher áreas que apresentassem características diferentes quanto ao padrão de vegetação e construções no entorno. A Figura 11 apresenta as áreas selecionadas, bem como os limites de recorte utilizados.

Figura 11 - Áreas de estudos selecionadas: Centro de Pres. Prudente (a), Campus da UNESP (b) e Parque do Povo (c)



Fonte: Imagens aéreas cedidas pela empresa Engemap (2012) e editadas pelo autor (2017).

As áreas de estudos foram escolhidas de modo a contemplar características diferentes. O centro da cidade de Presidente Prudente, Figura 11 (a), cujas coordenadas aproximadas são $(\varphi, \lambda) = (22^{\circ}07'21''S, 51^{\circ}23'18''W)$, foi escolhido por conter vegetação em ambiente altamente urbanizado, com árvores esparsas e uma praça com vegetação densa próximas entre si. A Figura 11 (b), expõe parte do campus da FCT/UNESP ($22^{\circ}07'23''S, 51^{\circ}24'31''W$). Esta área é composta por árvores de diferentes tipos, tamanhos e distribuição, o que permite analisar a detecção de árvores isoladas e árvores que apresentem vizinhos próximos, porém não sobrepostos. A terceira área de estudo, Figura 11 (c), é formada por parte do Parque do Povo de Pres. Prudente ($22^{\circ}08'18''S, 51^{\circ}23'42''W$) apresentando árvores com folhagens mais esparsas. Esta área possui uma forma predominantemente

alongada, com a presença de cabos de alta tensão e vizinha a um ambiente urbanizado com grande concentração de edificações, além de duas avenidas de grande circulação de veículos.

O Quadro 3 apresenta o total de pontos pertencentes aos dados lidar disponíveis para cada recorte utilizado, bem como os pontos remanescentes após o processo de classificação e filtragem pelo *software* LAStools, como descrito na Seção 3.3.1. Além disso, o quadro apresenta o número aproximado de indivíduos arbóreos e aglomerados que cada um dos recortes contém.

Quadro 3 - Informações gerais das áreas de estudo

Área de estudo	Total de pontos presentes no arquivo LAS	Nº de pontos de vegetação	Nº de indivíduos arbóreos	Nº de aglomerados
Centro	350916	69645	58	16
UNESP	453951	155305	84	16
Parque do Povo	445592	82392	76	18

Fonte: Autor (2017)

O total de indivíduos arbóreos e aglomerados foi obtido por meio da contagem, manual, em fotos aéreas de alta resolução tomadas em datas próximas às do voo que coletou a nuvem de pontos. Foram considerados aglomerados, conjuntos de árvores que apresentassem alguma sobreposição, mesmo que pudessem ser separáveis a olho nu. Nos Apêndices A, B e C são apresentados os mapas de referência, utilizados na análise de qualidade.

3.2 Material

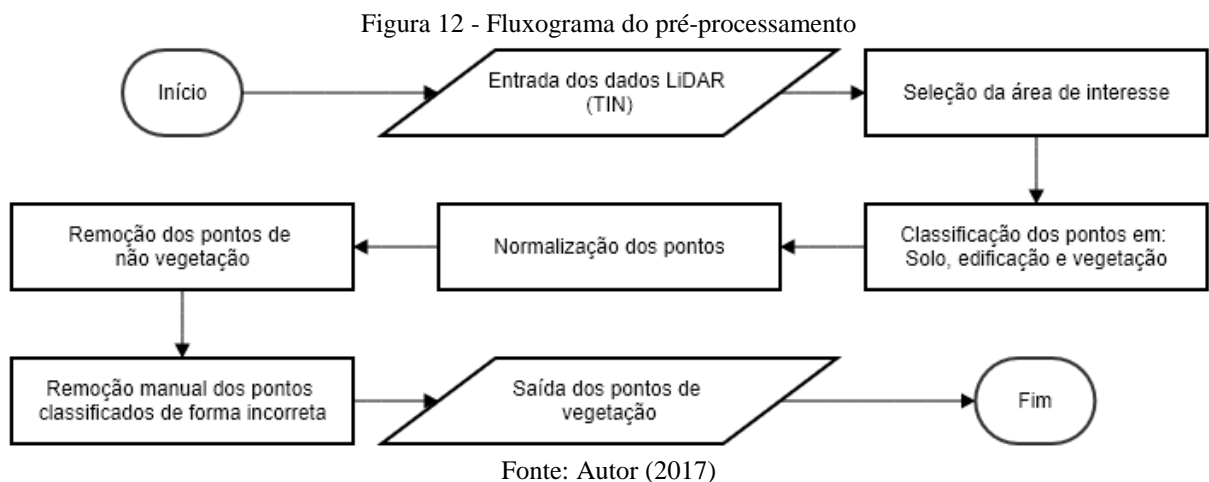
Na sequência, é apresentada uma relação de material que será utilizado no desenvolvimento do trabalho proposto:

- Dados lidar, com aproximadamente 5,5 pontos/m² da cidade de Presidente Prudente, fornecidos pela empresa ENGEMAP – Engenharia, Mapeamento e Aerolevanteamento Ltda., adquiridos em ano de 2014, com o sistema RIEGL modelo LMS-Q680i;
- Imagens aéreas de alta resolução, GSD de 12 e 30 cm, adquiridas em 2012 com a câmara Hasselblad e cedidas pela empresa ENGEMAP;
- Compilador Code::Blocks v. 16.01 (Disponível em: www.codeblocks.org);
- LAStools v. 120723 (Disponível em: <http://rapidlasso.com>);
- CloudCompare v. 2.8 (Disponível em: <http://www.cloudcompare.org>);
- FugroViewer v. 2.22 (Disponível em: <http://www.fugroviewer.com>);
- Qhull v. 7.2.0 (Disponível em: <http://www.qhull.org>).

3.3 Método

3.3.1 Pré-processamento

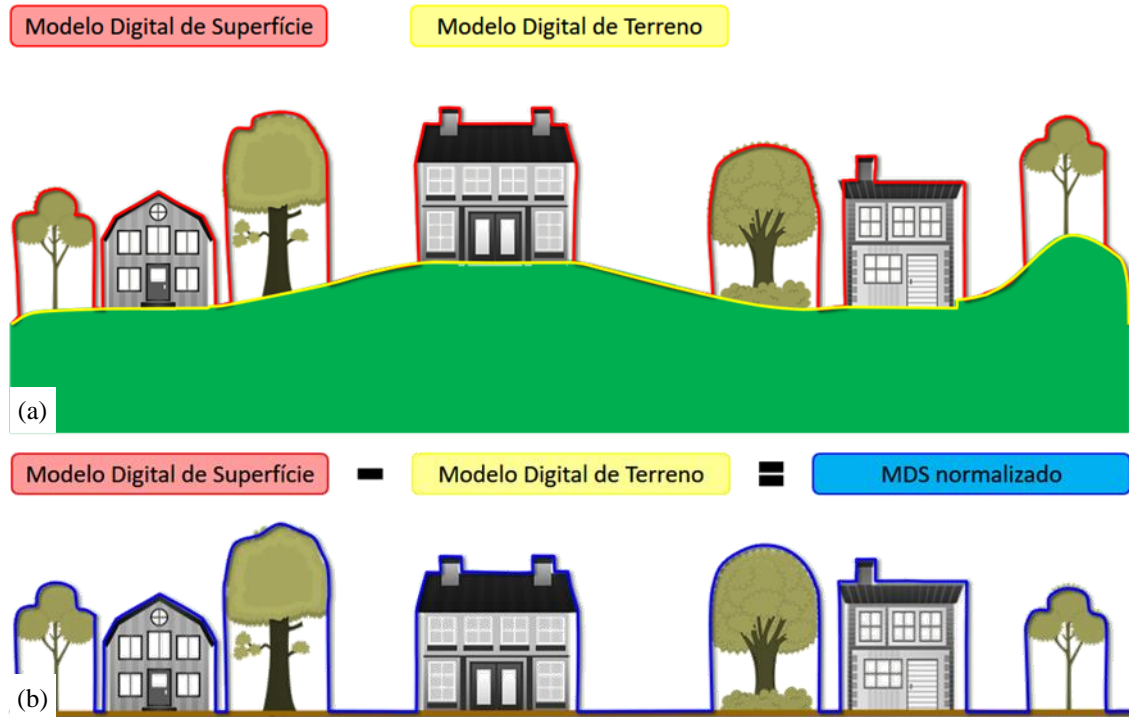
Uma etapa de pré-processamento dos dados é prevista, onde uma classificação, normalização e duas filtragens são realizadas. Para isso, são utilizados alguns dos *softwares* que compõem a biblioteca LAStools, que se mostra como uma ferramenta poderosa quando se objetiva o tratamento deste tipo de dado. O procedimento é apresentado como indicado na Figura 12.



O processo de normalização pode ser entendido como a subtração da altitude dos pontos que caracterizam um MDT no conjunto de pontos que formem um MDS, Figura 13 (a). Desta forma, tem-se como resultado uma nuvem tridimensional onde a terceira coordenada deixa de representar a altitude e passa a representar a altura dos pontos, Figura 13 (b). Segundo Véga et al. (2014), o processo de normalização pode modificar a forma da copa de árvores. Essa modificação que a copa de cada indivíduo arbóreo pode sofrer, ao realizar o processo de normalização, pode introduzir erros no processo de segmentação e, posteriormente, no processo de estimação das variáveis dendrométricas das árvores segmentadas, como volume da copa e estimativa da altura da árvore.

O procedimento de remoção de pontos, tem por objetivo a extração de pontos que não sejam de interesse, como pontos de edificação, solo e outras feições, permanecendo assim, somente os pontos de vegetação. Como é possível notar, uma etapa de remoção manual se faz necessária, de modo a retirar os pontos que tenham sido classificados como vegetação de forma errada. Para isso, utilizou-se do *software* CloudCompare o qual permite selecionar um conjunto de pontos na nuvem e removê-los.

Figura 13 - Geração do Modelo Digital de Superfície Normalizada (MDSn): MDS e MDT (a) e MDSn (b)



Fonte: Autor (2017)

3.3.2 Processamento

Na etapa seguinte, é realizada a segmentação dos pontos a partir de sementes selecionados na nuvem disponível, que contém apenas pontos de vegetação. O processo de segmentação faz uso do conjunto de pontos que caracterizam vegetação, ordenados quanto à altura. Durante o processamento, o segmentador utiliza um limiar de aceitação de distância mínima na rotulação dos pontos quanto aos segmentos criados. Aliado ao limiar de distância (P_{dm}), um parâmetro de *buffer* (P_b), que busca aumentar a área de atuação de cada segmento, ampliando as chances de um ponto ser rotulado a um segmento e não dar origem a um novo, também é utilizado. O procedimento de segmentação é apresentado de forma simplificada na Figura 14.

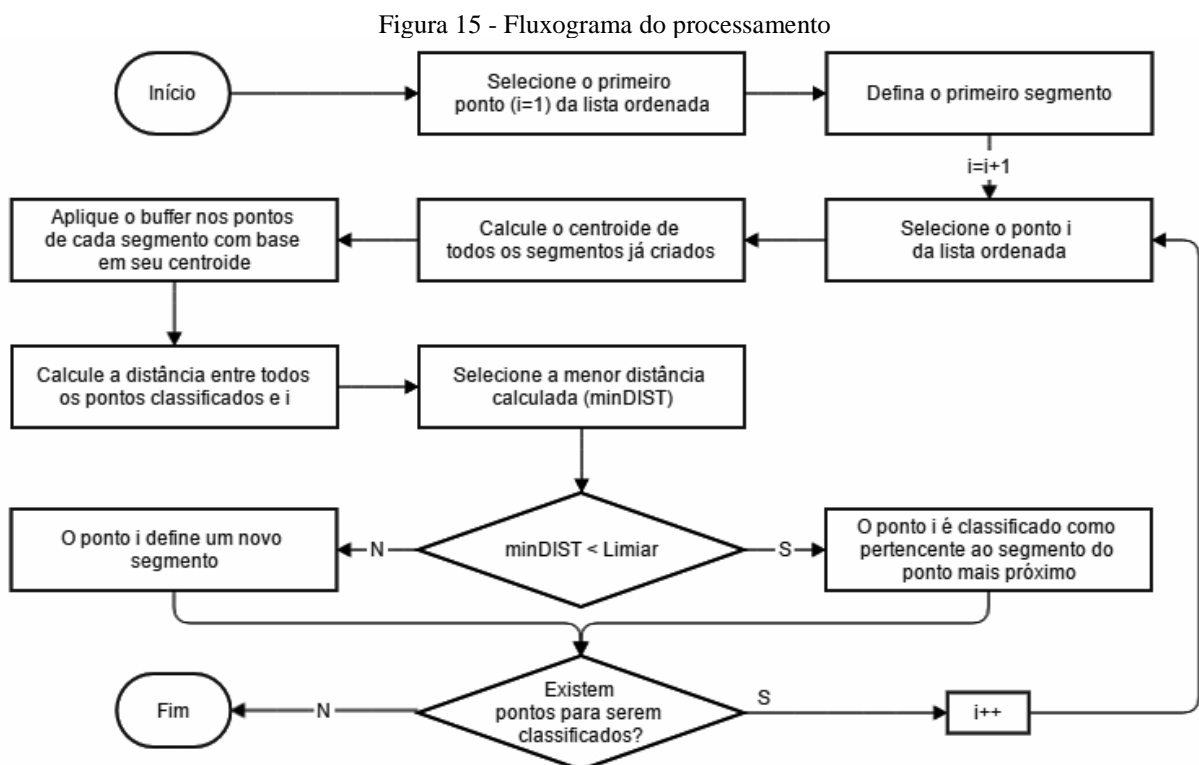
Figura 14 - Esquema conceitual do processamento



Fonte: Autor (2017)

A partir da lista ordenada de pontos, o ponto de maior altura da nuvem define o primeiro segmento (S_i), com $i = 1$, que será o único segmento utilizado para teste de pontos até que um ponto teste (P^T) defina um novo segmento. O próximo ponto da lista de altura (P^T) é testado contra todos os pontos já segmentados anteriormente. Para isso, os segmentos têm seus centroides calculados e, a partir desse, as coordenadas polares dos pontos, pertencentes a cada segmento são calculadas. Então, por meio do valor de P_b definido pelo usuário, as coordenadas polares são modificadas e, posteriormente, transformadas novamente em coordenadas tridimensionais.

Em seguida, P^T tem sua distância calculada para todos os pontos que tiveram suas coordenadas modificadas pelo P_b aplicado, em busca da menor distância. Caso a menor distância calculada encontrada seja menor que o P_{dm} definido, o ponto é rotulado como pertencente ao segmento do ponto que proporcionou a menor distância. Caso contrário, o ponto P^T define um novo segmento S_{i+1} . O processo descrito é repetido de forma exaustiva até que todos os pontos tenham sido comparados e rotulados como sendo de algum segmento. A Figura 15 apresenta o processo de segmentação de forma detalhada e esquemática.

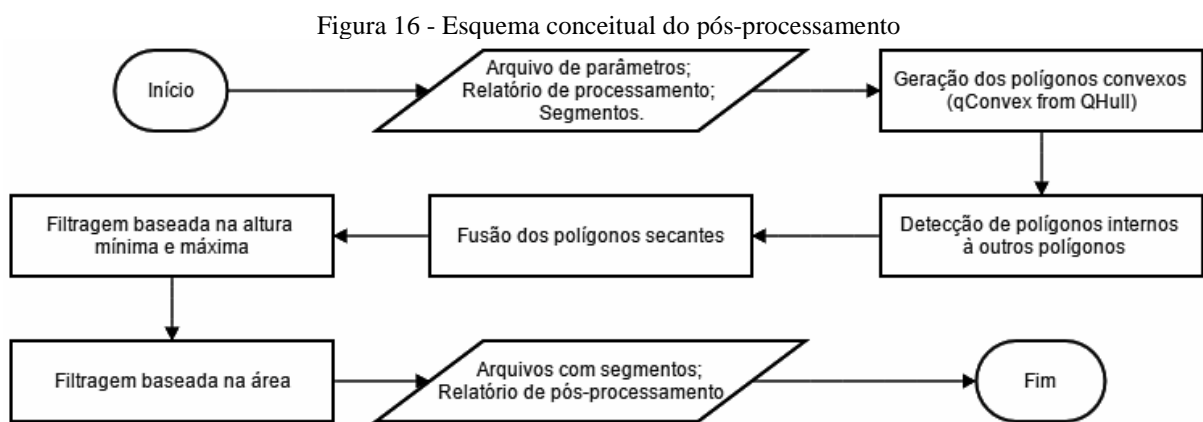


Fonte: Autor (2017)

Uma vez que todos os pontos tenham sido segmentados, pode-se dar início então a etapa de pós-processamento.

3.3.3 Pós-processamento

Na etapa de pós-processamento os segmentos criados na etapa anterior são analisados, de forma a reagrupá-los por meio da verificação do perímetro comum (P_{pc}). Além disso, esta etapa busca filtrar possíveis segmentos que possivelmente não sejam indivíduos arbóreos. Para isso, os segmentos têm suas alturas e áreas analisadas e comparadas com os limiares estabelecidos. A Figura 16 apresenta, de forma conceitual, os processos envolvidos nesta etapa. É possível notar que ao total são realizados três testes, de modo a analisar os segmentos criados pelo processo descrito anteriormente.



Fonte: Autor (2017)

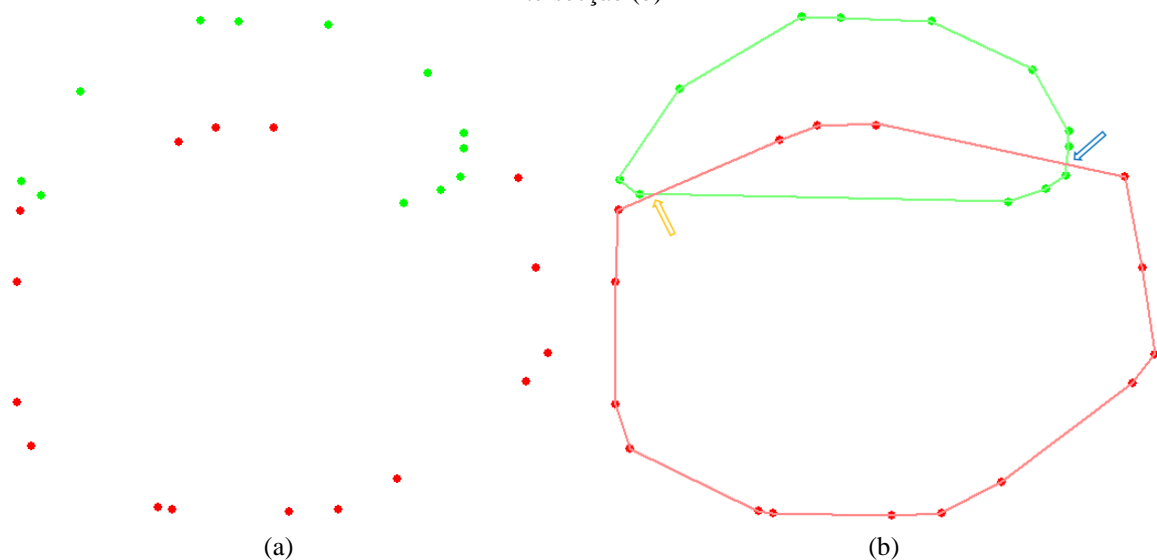
A princípio, os segmentos gerados na etapa de processamento ou segmentação, têm seus polígonos convexos gerados por meio do *software* QHull. A etapa seguinte, busca analisar os polígonos comparando-os em busca de polígonos que apresentem áreas de sobreposição. O teste é realizado sempre considerando dois polígonos, sendo um de referência (P^R) e outro de teste (P^T). O polígono de referência é fixo e cada ponto do polígono de teste deve ser analisado, verificando se eles são internos ou externos ao P^R .

Para este fim, uma função que detecta se um determinado ponto é interior a um dado polígono foi implementada. A implementação se baseou nas diretrizes apresentadas por Franklin (2006) de modo a determinar se um ponto é interior a um dado polígono. Para isso é necessário que se determine a equação das retas formadas pelos vértices que compõem o polígono em questão. Cada equação pode ser expressa em função das coordenadas dos pontos que passem por ela e, desta forma, dados os pontos i e j e suas respectivas coordenadas, é possível, por meio da Equação (9), determinar a equação da reta que passe por ambos os pontos.

$$(Y_i - Y_j)x + (X_j - X_i)y + (X_i Y_j - X_j Y_i) = 0 \quad (9)$$

Uma vez que todas as equações das retas passantes por todos os pontos que formam P^R tenham sido determinadas, pode-se dar início à verificação de um ponto n qualquer com coordenadas (x,y) . Para isso, o ponto n , de P^T , terá suas coordenadas substituídas nas equações das retas estabelecidas para o polígono de referência. O ponto n é considerado interior ao polígono caso o mesmo apresente resultado positivo para todas as equações de retas que constituem P^R . Caso este ponto apresente resultado negativo para alguma equação de reta, o mesmo é considerado como um ponto exterior. A Figura 17 representa um exemplo onde é possível visualizar um polígono referência (vermelho) e um polígono teste (verde).

Figura 17 - Polígono referência (P^R), em vermelho, e polígono teste (P^T), na cor verde: vértices (a) e pontos de intersecção (b)



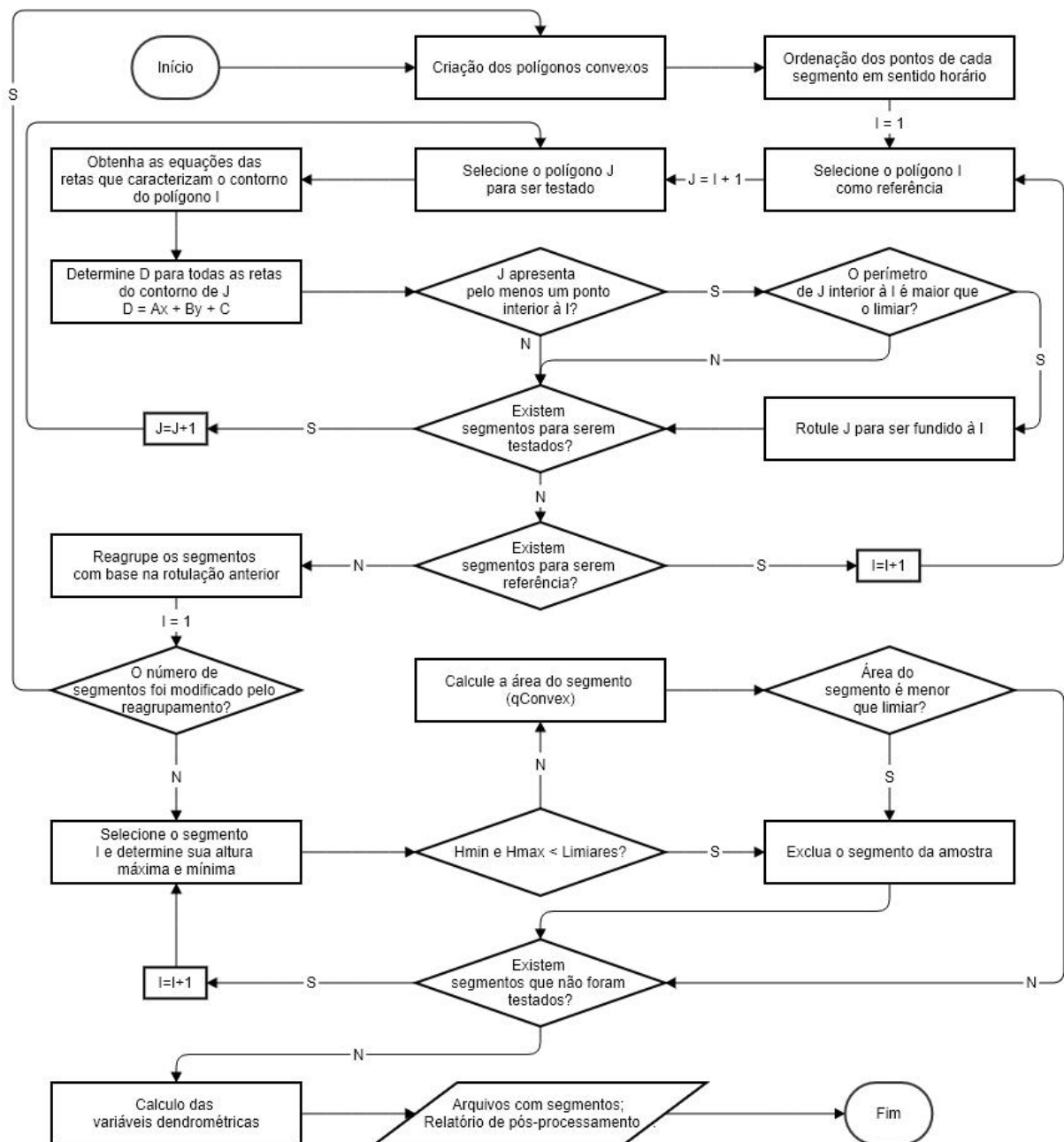
Fonte: Autor (2017)

Pode-se notar por meio da Figura 17 (a) que P^T apresenta três pontos interiores ao P^R . Seguindo a proposta de solução, uma vez que P^T tenha seu primeiro ponto interior ao P^R identificado, as coordenadas do ponto de intersecção, representado pela seta amarela da Figura 17 (b), são calculadas e a distância entre o ponto de intersecção e o ponto de P^T é calculada e armazenada. Enquanto P^T apresentar pontos internos ao P^R , a distância entre estes pontos é calculada e armazenada, uma vez que, ao se encontrar um ponto externo, após uma sequência de pontos internos, o vértice de intersecção (seta azul na Figura 17 (b)) é determinado e a distância entre este ponto e o último ponto de P^R interior é calculada. Em seguida, a distância perimetral interior é comparada com o perímetro total de P^T . Caso esta relação seja maior que o limiar definido pelo usuário, Equação (10), os polígonos são marcados para o processo de fusão.

$$\frac{\text{Dist. Perimetral}}{\text{Perímetro total}} \geq P_{pc}[\%] \quad (10)$$

O processo de verificação é encerrado, de forma parcial, quando o penúltimo polígono é utilizado como P^R . Desta forma, os polígonos marcados têm seus segmentos fundidos e este novo conjunto de pontos dará origem a novos polígonos convexos. Esta etapa é realizada de forma repetitiva considerando sempre as possíveis fusões de segmentos. Caso o processo de verificação seja encerrado e nenhum polígono tenha sido marcado para fusão, tem-se que o processo de reagrupamento está completo. A Figura 18 apresenta de forma esquemática e detalhada da metodologia adotada no pós-processamento.

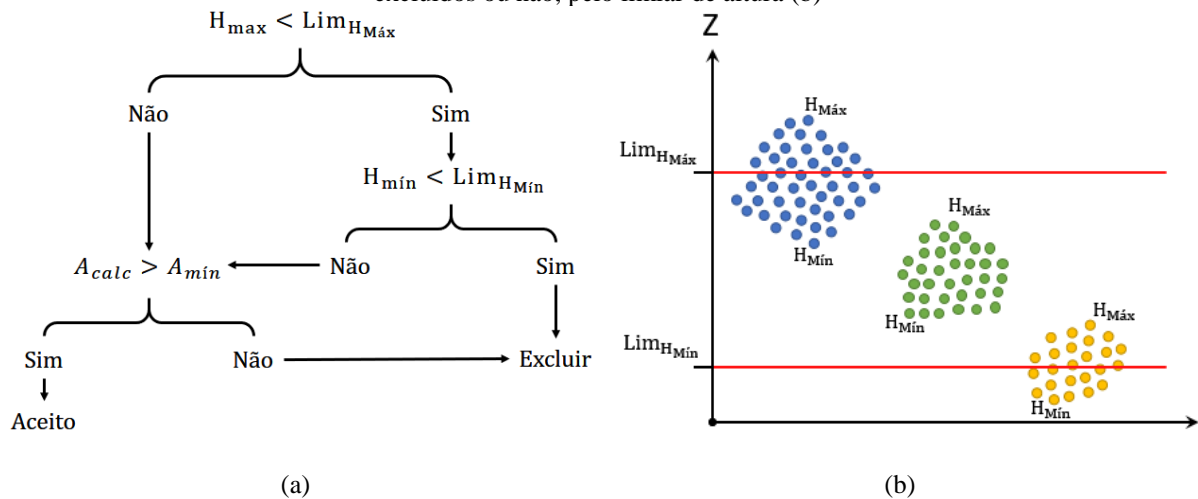
Figura 18 - Fluxograma do pós-processamento



Fonte: Autor (2017)

Uma vez que o processo de reagrupamento tenha sido finalizado, a etapa de filtragem é iniciada. A primeira filtragem considera as alturas máximas e mínimas de cada segmento, $Lim_{H_{Máx}}$ e $Lim_{H_{Mín}}$, respectivamente. Desta forma, todo segmento tem seu ponto de máximo detectado e caso o mesmo seja menor que $Lim_{H_{Máx}}$, o segmento tem sua altura mínima detectada. Se este valor estiver abaixo que o $Lim_{H_{Mín}}$, o segmento é excluído (Figura 19).

Figura 19 - Análise quanto ao limiar de altura máxima e mínima: Fluxo de teste (a) e exemplo de segmentos excluídos ou não, pelo limiar de altura (b)



Fonte: Autor (2017)

Uma segunda filtragem busca eliminar polígonos que apresentem uma área menor que a área mínima ($A_{mín}$) estipulada pelo usuário. Para isso, todos os segmentos têm sua área determinada, por meio do método de Gauss, para cálculo de área de polígonos irregulares. Assim, os polígonos com áreas menores que $A_{mín}$ são excluídos. Uma vez que os segmentos são compostos por pontos no espaço 3D, a área é determinada na projeção dos pontos no plano (X,Y). Ao final do processo, um relatório de processamento é gerado contendo informações gerais como: número de pontos utilizados na nuvem original; total de fragmentos criados na etapa de processamento; número de fragmentos reagrupados; total de segmentos excluídos pelo limiar de altura e área e informações dendrométricas dos segmentos como: área da copa; alturas (mínima, máxima, média, desvio-padrão e variância) e raio da copa (mínimo, máximo, médio, desvio-padrão e variância).

3.3.4 Estimativas dendrométricas

Ao final do processo de resegmentação e filtragem, tem-se a etapa de estimativa das variáveis dendrométricas dos segmentos criados. Independente da criação de um

aglomerado de árvores ou da detecção de um indivíduo arbóreo, ambos tiveram as mesmas variáveis determinadas, sendo elas:

I. Área da copa: Obtida por meio das coordenadas tridimensionais dos vértices do polígono convexo, após projeção no plano horizontal.

II. Altura da vegetação: Foram estimadas as seguintes informações quanto à altura: mínima, máxima, média, desvio padrão e variância.

III. Raio da vegetação: De forma similar à altura, determinou-se: raio mínimo, máximo, médio, desvio padrão e variância. Para a realização desses cálculos, foram considerados todos os pontos que constituem o polígono convexo do segmento.

4 EXPERIMENTOS E RESULTADOS

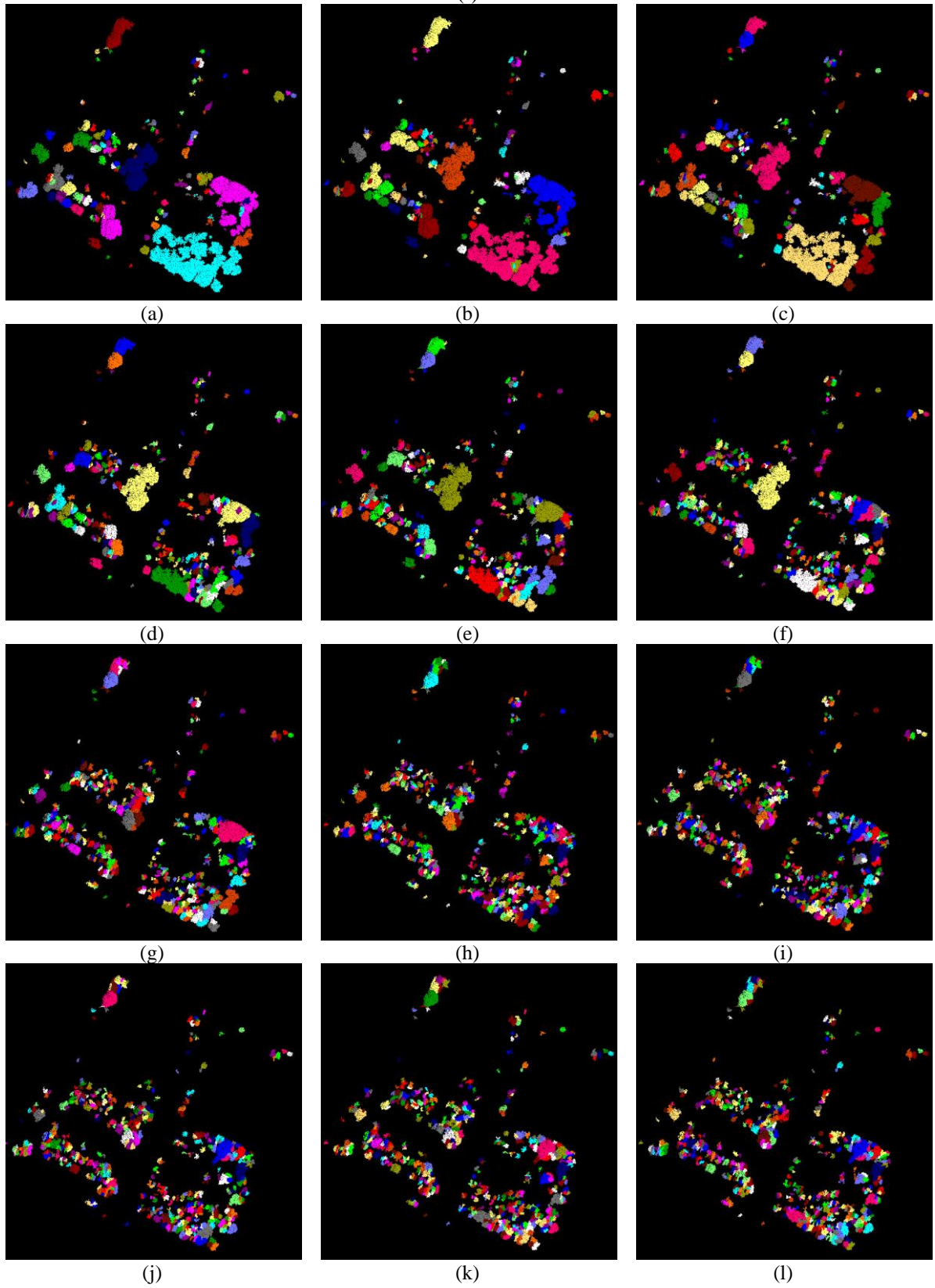
Esta seção apresenta os resultados obtidos nas etapas de processamento e pós-processamento. Nota-se, que os resultados foram divididos e organizados quanto a etapa metodológica e as áreas utilizadas.

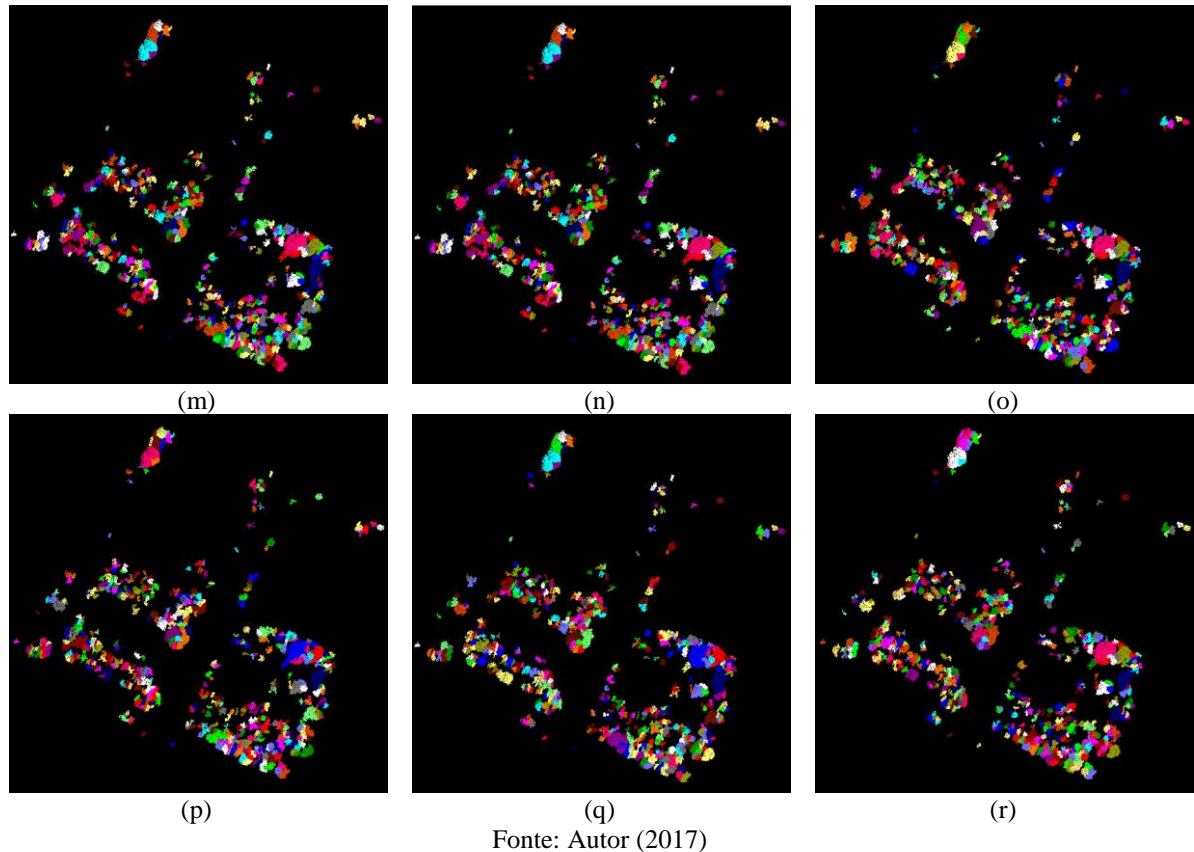
Considerando-se que os parâmetros envolvidos no processo de segmentação da nuvem de pontos são: distância mínima (P_{dm}) e *buffer* (P_b) de área de atuação, os processamentos buscaram analisar a influência de cada um dos limiares. Foram considerados quatro valores para cada um dos parâmetros envolvidos (P_{dm} e P_b), resultando assim em um total de dezesseis combinações no processamento.

Já na etapa de pós-processamento, o limiar de perímetro comum (P_{pc}) foi investigado com o objetivo de verificar a sensibilidade do mesmo na produção dos resultados finais. Para isso, utilizou-se uma das áreas de estudo como referência, de modo a aplicar uma variação fina do parâmetro. Desta forma, a área central teve seus segmentos pós-processados considerando o intervalo de [5% a 90%], com incrementos de 5%, como apresentado na Figura 20.

Como pode-se observar, ao utilizar valores pequenos para P_{pc} , o agrupamento é bem visível, sendo que em alguns casos até excessivo, não separando algumas árvores que deveriam ser separadas. Por outro lado, ao adotar valores maiores, percebe-se claramente uma grande fragmentação, o que também não é realista, pois muitas árvores acabam por ser divididas, dada a irregularidade de suas copas. Deste modo, em função desta análise visual, comparando o resultado do processamento com o mapa de referência, observou-se que os limiares cujos resultados foram mais próximos da realidade, correspondem àqueles com percentuais menores ou iguais a 20%. Por esta razão, os intervalos escolhidos para a utilização na etapa de pós processamento foram: 5%, 10%, 15% e 20%.

Figura 20 - Pós-processamento considerando P_{pc} como: 5% (a), 10% (b), 15% (c), 20% (d), 25% (e), 30% (f), 35% (g), 40% (h), 45% (i), 50% (j), 55% (k), 60% (l), 65% (m), 70% (n), 75% (o), 80% (p), 85% (q) e 90% (r)



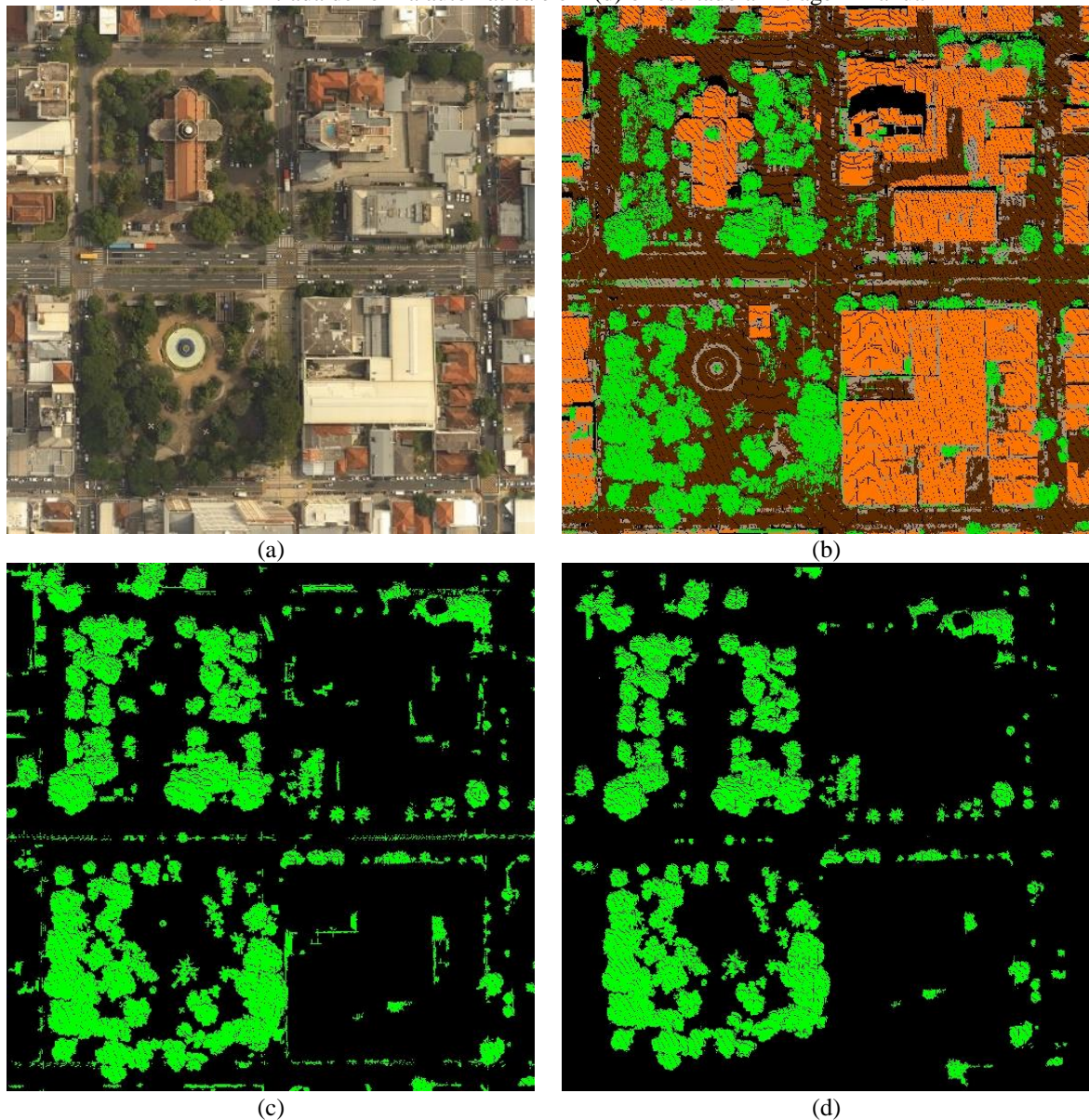


Os demais parâmetros envolvidos no pós-processamento não foram modificados por se tratarem de limiares utilizados no processo de filtragem. Desta forma, os parâmetros de filtragem foram mantidos em 2 m e 3 m para as alturas mínima e máxima, respectivamente; e 10 m² para o limiar de filtragem quanto a área. Os resultados obtidos são apresentados na sequência.

4.1 Área central de Presidente Prudente

Uma imagem de referência da área utilizada é mostrada na Figura 21 (a). Na sequência, tem-se o recorte da nuvem de pontos utilizado para caracterizar o centro de Presidente Prudente, ver (b), onde é possível perceber as feições classificadas por meio do *software* LAStools. Na Figura 21 (c), são apresentados os pontos que caracterizam a vegetação após a filtragem automática e, por fim, em (d), o resultado obtido por meio do refinamento manual, onde os pontos que foram rotulados como vegetação de forma errônea pelo classificador do LAStools são removidos.

Figura 21 - Centro: Em (a) tem-se a imagem de referência, em (b) a nuvem de pontos classificada, em (c) a nuvem filtrada de forma automática e em (d) o resultado a filtragem manual



Legenda usada em (b): solo (marrom), edificação (laranja), vegetação (verde), e pontos não classificados (cinza).

Fonte: Autor (2017)

Nota-se, por meio da Figura 21, que o processo de filtragem manual é imprescindível devido aos falsos positivos encontrados após a classificação, como a presença de fachadas e prédios que foram classificados como vegetação.

O total de segmentos obtidos pelo processo de segmentação, para cada valor de limiar, é apresentado na Tabela 1. Conforme já mencionado, os processamentos foram realizados considerando variações quanto ao limiar de distância (P_{dm}) e também o parâmetro de *buffer* (P_b), totalizando 16 combinações.

Tabela 1 - Número de segmentos obtidos pelo processamento (Centro)

		P_{dm}			
		1 m	2 m	3 m	4 m
P_b	0%	1536	379	205	155
	10%	1235	332	191	139
	20%	1054	299	177	128
	30%	961	283	166	119

Fonte: Autor (2017)

Os números de segmentos obtidos após a aplicação do pós-processamento, utilizando 4 limiares para o perímetro comum (P_{pc}), são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Número de indivíduos e aglomerados obtidos pelo pós-processamento (Centro)

		P_{dm}															
		1 m				2 m				3 m				4 m			
P_b	0%	128	138	180	204	71	108	133	149	77	73	103	111	57	76	84	99
	10%	65	73	106	123	70	66	83	92	63	66	79	83	52	62	68	70
	20%	58	69	95	110	55	58	77	77	47	52	54	58	41	45	49	57
	30%	54	61	55	59	49	51	52	64	47	48	49	52	39	40	41	47
		5%	10%	15%	20%	5%	10%	15%	20%	5%	10%	15%	20%	5%	10%	15%	20%

 P_{pc}

Fonte: Autor (2017)

O total de indivíduos arbóreos e aglomerados obtidos em cada um dos processos foi comparado com os valores obtidos pela contagem de referência apresentada na Seção 3.1. Em seguida, estes valores foram utilizados de modo a obter os parâmetros de qualidade, como acurácia temática (AT), completeza (C) e *F-Score* (FS), por meio das equações apresentadas na Seção 2.6. Os resultados obtidos para a seleção de indivíduos arbóreos são apresentados na Tabela 3, enquanto os obtidos para a seleção dos aglomerados são apresentados na Tabela 4. A fim de indicar o melhor e pior resultado, para cada objeto de interesse, os valores correspondentes a estes são destacados nas tabelas.

Tabela 3 - Indicadores de qualidade na seleção dos indivíduos arbóreos (Centro)

		AT	C	FS	AT	C	FS	AT	C	FS	AT	C	FS	
P_{dm}	1 m	46,58	58,62	51,91	51,85	48,28	50,00	67,39	53,45	59,62	97,37	63,79	77,08	5%
		37,35	53,45	43,97	56,86	50,00	53,21	68,00	58,62	62,96	78,57	56,90	66,00	10%
		37,33	48,28	42,11	47,14	56,90	51,56	54,69	60,34	57,38	73,17	51,72	60,61	15%
		66,67	41,38	51,06	41,33	53,45	46,62	47,14	56,90	51,56	67,44	50,00	57,43	20%
	2 m	68,00	58,62	62,96	78,18	74,14	76,11	80,00	62,07	69,90	90,24	63,79	74,75	5%
		64,71	75,86	69,84	72,55	63,79	67,89	82,98	67,24	74,29	85,37	60,34	70,71	10%
		58,90	74,14	65,65	73,77	77,59	75,63	76,79	74,14	75,44	88,10	63,79	74,00	15%
		53,09	74,14	61,87	72,13	75,86	73,95	74,55	70,69	72,57	87,23	70,69	78,10	20%
	3 m	74,58	75,86	75,21	72,34	58,62	64,76	82,05	55,17	65,98	66,67	44,83	53,61	5%
		70,37	65,52	67,86	78,00	67,24	72,22	80,95	58,62	68,00	69,23	46,55	55,67	10%
		74,19	79,31	76,67	77,36	70,69	73,87	81,40	60,34	69,31	75,00	51,72	61,22	15%
		64,71	75,86	69,84	77,36	70,69	73,87	78,72	63,79	70,48	73,17	51,72	60,61	20%
	4 m	75,56	58,62	66,02	77,50	53,45	63,27	79,41	46,55	58,70	66,67	37,93	48,35	5%
		76,36	72,41	74,34	75,56	58,62	66,02	78,38	50,00	61,05	70,59	41,38	52,17	10%
		73,33	75,86	74,58	82,61	65,52	73,08	78,95	51,72	62,50	71,43	43,10	53,76	15%
		64,06	70,69	67,21	82,61	65,52	73,08	71,74	56,90	63,46	60,98	43,10	50,51	20%
		0%			10%			20%			30%			

P_bLegenda: Acurácia temática (AT), completudeza (C) e *F-Score* (FS).

Fonte: Autor (2017)

Tabela 4 - Indicadores de qualidade na seleção de aglomerados (Centro)

		AT	C	FS	AT	C	FS	AT	C	FS	AT	C	FS	
P_{dm}	1 m	3,64	12,50	5,63	63,64	43,75	51,85	50,00	37,50	42,86	37,50	37,50	37,50	5%
		3,64	12,50	5,63	31,82	43,75	36,84	26,32	31,25	28,57	26,32	31,25	28,57	10%
		0,00	0,00	0,00	13,89	31,25	19,23	9,68	18,75	12,77	35,71	31,25	33,33	15%
		0,00	0,00	0,00	8,33	25,00	12,50	10,00	25,00	14,29	25,00	25,00	25,00	20%
	2 m	9,52	12,50	10,81	26,67	25,00	25,81	30,00	18,75	23,08	50,00	25,00	33,33	5%
		7,50	18,75	10,71	6,67	6,25	6,45	27,27	18,75	22,22	30,00	18,75	23,08	10%
		5,00	18,75	7,89	13,64	18,75	15,79	14,29	18,75	16,22	40,00	25,00	30,77	15%
		0,00	0,00	0,00	9,68	18,75	12,77	13,64	18,75	15,79	23,53	25,00	24,24	20%
	3 m	16,67	18,75	17,65	12,50	12,50	12,50	37,50	18,75	25,00	37,50	18,75	25,00	5%
		15,79	18,75	17,14	18,75	18,75	18,75	20,00	12,50	15,38	22,22	12,50	16,00	10%
		9,76	25,00	14,04	11,54	18,75	14,29	18,18	12,50	14,81	22,22	12,50	16,00	15%
		6,98	18,75	10,17	13,33	25,00	17,39	18,18	12,50	14,81	18,18	12,50	14,81	20%
	4 m	16,67	12,50	14,29	25,00	18,75	21,43	28,57	12,50	17,39	33,33	12,50	18,18	5%
		19,05	25,00	21,62	17,65	18,75	18,18	12,50	6,25	8,33	33,33	12,50	18,18	10%
		12,50	18,75	15,00	9,09	12,50	10,53	9,09	6,25	7,41	33,33	12,50	18,18	15%
		0,00	0,00	0,00	8,33	12,50	10,00	27,27	18,75	22,22	33,33	12,50	18,18	20%
		0%			10%			20%			30%			

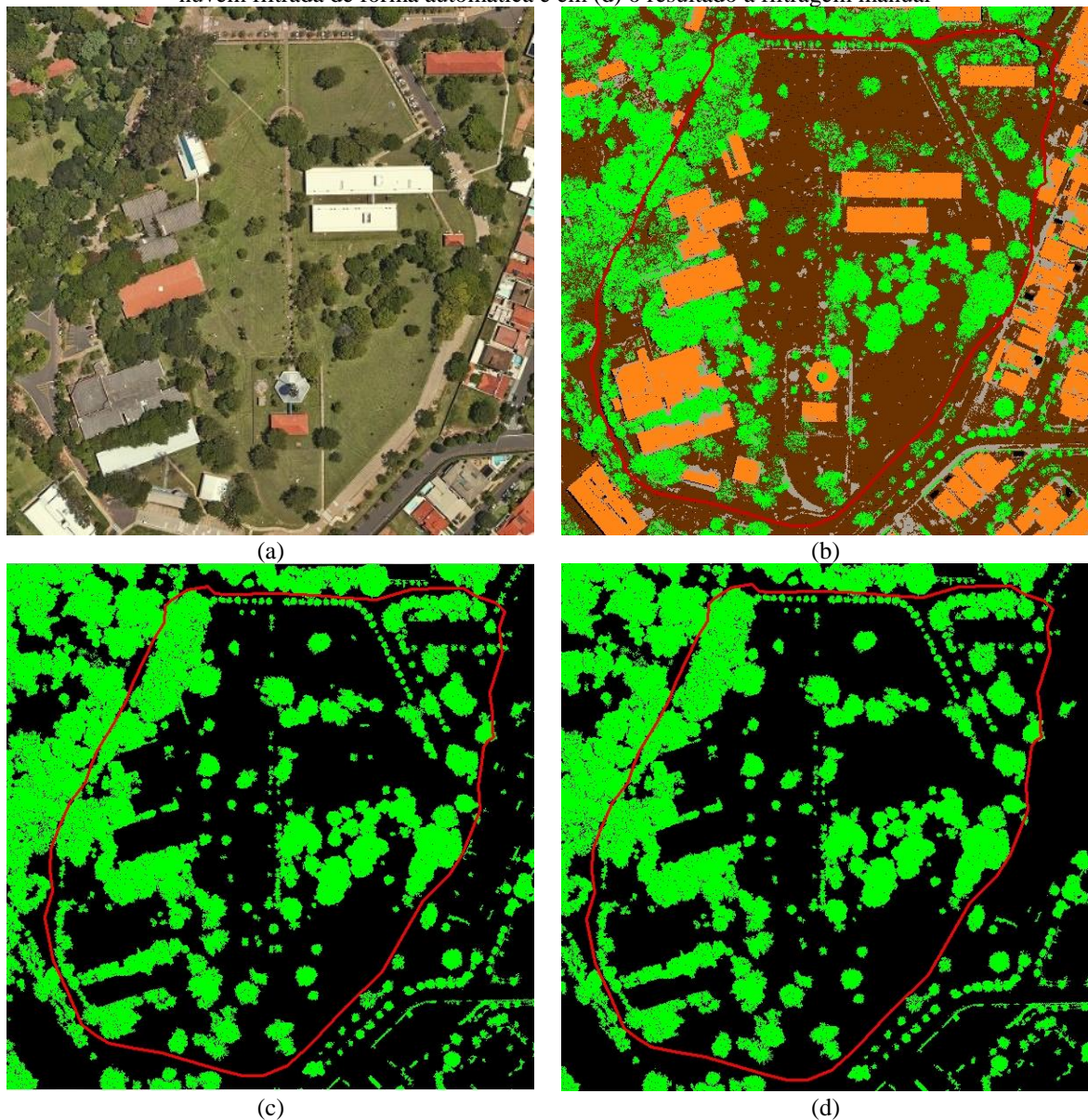
P_bLegenda: Acurácia temática (AT), completudeza (C) e *F-Score* (FS).

Fonte: Autor (2017)

4.2 UNESP

Na Figura 22 (a) está representada a região que compõe o recorte do campus da UNESP utilizado; enquanto que em (b) é sobreposto o limite (definido pelo polígono vermelho) onde foram realizadas as análises. Na Figura 22 (c), observa-se os pontos classificados como vegetação, por meio do uso do *software* LAStools, após remoção dos pontos de não interesse; já em (d), os pontos utilizados no procedimento de extração de indivíduos e aglomerados são expostos. Vale ressaltar que nesta nuvem um processo de remoção manual de pontos erroneamente classificados como vegetação é aplicado.

Figura 22 - UNESP: Em (a) tem-se a imagem de referência, em (b) a nuvem de pontos classificada, em (c) a nuvem filtrada de forma automática e em (d) o resultado a filtragem manual



Legenda usada em (b): solo (marrom), edificação (laranja), vegetação (verde) pontos não classificados (cinza). O polígono vermelho representa o recorte utilizado para o processamento dos pontos na metodologia proposta.

Fonte: Autor (2017)

Diferente da área central, apresentada anteriormente, o recorte do campus da UNESP não sofreu muitas alterações devido a filtragem manual, uma vez que os elementos que compõem a área de estudo são, na sua maioria, árvores e prédios de poucos andares, não resultando em muitos falsos positivos. Os números de segmentos obtidos pela aplicação do processo de segmentação são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Número de segmentos obtidos pelo processamento (UNESP)

		P_{dm}			
		1 m	2 m	3 m	4 m
P_b	0%	4161	943	448	274
	10%	3470	827	388	237
	20%	2999	728	340	212
	30%	2572	650	308	199

Fonte: Autor (2017)

Após a aplicação do pós-processamento, foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Número de indivíduos e aglomerados obtidos pelo pós-processamento (UNESP)

		P_{dm}															
		1 m				2 m				3 m				4 m			
P_b	0%	141	158	214	298	114	134	160	175	106	118	126	153	84	97	103	110
	10%	110	143	150	169	104	117	136	146	83	88	100	105	56	68	76	81
	20%	89	95	118	134	81	88	95	98	6	12	72	85	41	45	50	58
	30%	74	77	81	95	61	61	73	73	5	5	5	37	10	5	38	5
		5%	10%	15%	20%	5%	10%	15%	20%	5%	10%	15%	20%	5%	10%	15%	20%

P_{pc}

Fonte: Autor (2017)

Os indicadores de qualidade para a área de estudo do campus da UNESP são apresentados na Tabela 7, para a seleção de indivíduos arbóreos, e na Tabela 8 para a seleção de aglomerados.

Tabela 7 - Índices de qualidade na seleção dos indivíduos arbóreos (UNESP)

		AT	C	FS	AT	C	FS	AT	C	FS	AT	C	FS		
P_{dm}	1 m	58,82	59,52	59,17	72,73	57,14	64,00	82,26	60,71	69,86	82,14	54,76	65,71	5%	P_{pc}
		54,44	58,33	56,32	58,44	53,57	55,90	67,69	52,38	59,06	87,04	55,95	68,12	10%	
		41,51	52,38	46,32	45,83	52,38	48,89	69,12	55,95	61,84	84,48	58,33	69,01	15%	
		32,76	45,24	38,00	14,14	16,67	15,30	50,00	47,62	48,78	86,89	63,10	73,10	20%	
	2 m	71,25	67,86	69,51	80,56	69,05	74,36	87,50	66,67	75,68	83,67	48,81	61,65	5%	
		62,77	70,24	66,29	70,37	67,86	69,09	83,82	67,86	75,00	86,00	51,19	64,18	10%	
		55,10	64,29	59,34	81,40	83,33	82,35	80,00	66,67	72,73	84,48	58,33	69,01	15%	
		53,27	67,86	59,69	72,34	80,95	76,40	79,17	67,86	73,08	86,21	59,52	70,42	20%	
	3 m	84,21	76,19	80,00	84,85	66,67	74,67	100,00	4,76	9,09	100,00	3,57	6,90	5%	
		80,23	82,14	81,18	86,36	67,86	76,00	77,78	8,33	15,05	100,00	3,57	6,90	10%	
		83,72	85,71	84,71	85,71	71,43	77,92	78,33	55,95	65,28	100,00	3,57	6,90	15%	
		83,87	92,86	88,14	80,82	70,24	75,16	78,33	55,95	65,28	90,00	32,14	47,37	20%	
	4 m	74,14	51,19	60,56	85,00	40,48	54,84	76,47	30,95	44,07	71,43	5,95	10,99	5%	
		68,12	55,95	61,44	76,09	41,67	53,85	76,32	34,52	47,54	100,00	3,57	6,90	10%	
		67,16	53,57	59,60	74,00	44,05	55,22	73,17	35,71	48,00	35,71	11,90	17,86	15%	
		65,15	51,19	57,33	69,23	42,86	52,94	68,18	35,71	46,88	100,00	3,57	6,90	20%	
		0%			10%			20%			30%				
P_b															

Legenda: Acurácia temática (AT), completudeza (C) e *F-Score* (FS).

Fonte: Autor (2017)

Tabela 8 - Indicadores de qualidade na seleção de aglomerados (UNESP)

		AT	C	FS	AT	C	FS	AT	C	FS	AT	C	FS		
P_{dm}	1 m	7,14	25,00	11,11	15,91	43,75	23,33	22,22	37,50	27,91	22,22	25,00	23,53	5%	P_{pc}
		2,94	12,50	4,76	9,09	37,50	14,63	20,00	37,50	26,09	26,09	37,50	30,77	10%	
		0,93	6,25	1,61	3,70	12,50	5,71	12,00	37,50	18,18	26,09	37,50	30,77	15%	
		0,55	6,25	1,01	2,86	12,50	4,65	9,26	31,25	14,29	20,59	43,75	28,00	20%	
	2 m	17,65	37,50	24,00	18,75	37,50	25,00	35,29	37,50	36,36	41,67	31,25	35,71	5%	
		12,50	31,25	17,86	22,22	50,00	30,77	25,00	31,25	27,78	45,45	31,25	37,04	10%	
		6,45	25,00	10,26	10,00	31,25	15,15	24,00	37,50	29,27	40,00	37,50	38,71	15%	
		2,94	12,50	4,76	9,62	31,25	14,71	19,23	31,25	23,81	33,33	31,25	32,26	20%	
	3 m	20,00	37,50	26,09	23,53	25,00	24,24	50,00	6,25	11,11	50,00	6,25	11,11	5%	
		21,88	43,75	29,17	18,18	25,00	21,05	33,33	6,25	10,53	50,00	6,25	11,11	10%	
		12,50	31,25	17,86	16,67	31,25	21,74	33,33	25,00	28,57	50,00	6,25	11,11	15%	
		8,33	31,25	13,16	15,63	31,25	20,83	8,00	12,50	9,76	14,29	6,25	8,70	20%	
	4 m	26,92	43,75	33,33	25,00	25,00	25,00	42,86	18,75	26,09	33,33	6,25	10,53	5%	
		32,14	56,25	40,91	22,73	31,25	26,32	28,57	12,50	17,39	0,00	0,00	0,00	10%	
		16,67	37,50	23,08	23,08	37,50	28,57	66,67	37,50	48,00	0,00	0,00	0,00	15%	
		11,36	31,25	16,67	20,69	37,50	26,67	42,86	37,50	40,00	0,00	0,00	0,00	20%	
		0%			10%			20%			30%				
P_b															

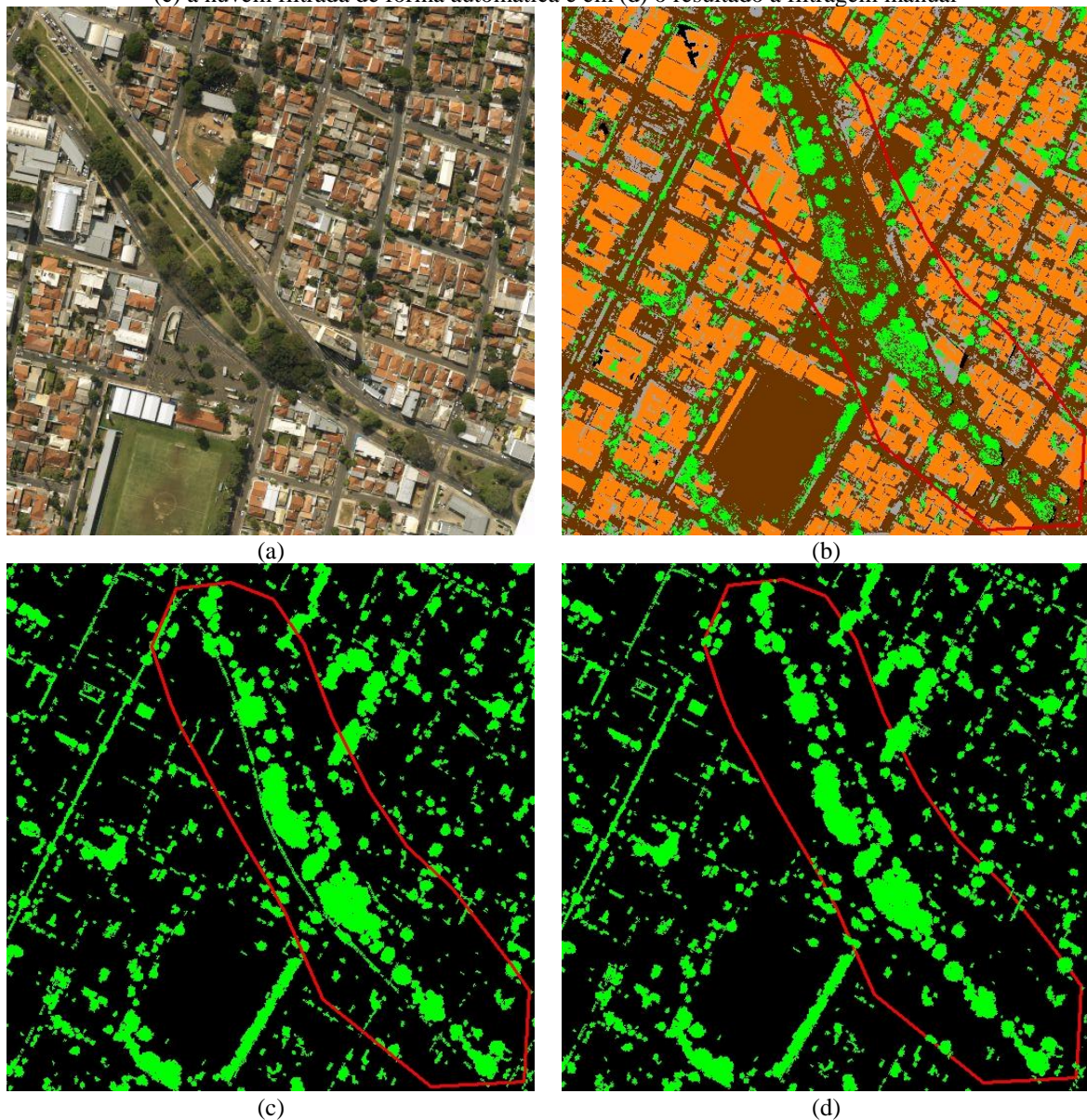
Legenda: Acurácia temática (AT), completudeza (C) e *F-Score* (FS).

Fonte: Autor (2017)

4.3 Parque do Povo

Na Figura 23 (a) pode-se observar a imagem de referência para a região que compõe a área de estudo do Parque do Povo de Pres. Prudente. O recorte utilizado para caracterizar o trecho escolhido é exibido em (b), por meio do polígono em vermelho destacado. Como realizado para as demais regiões, os pontos apresentados estão rotulados de acordo com as feições obtidas por meio do *software* LAStools. O resultado do processo de filtragem automática é evidenciado em (c), enquanto (d) apresenta a nuvem de pontos restantes após remoção dos falsos positivos, como linhas de alta tensão e fachadas de edificações.

Figura 23 - Parque do Povo: Em (a) tem-se a imagem de referência, em (b) a nuvem de pontos classificada, em (c) a nuvem filtrada de forma automática e em (d) o resultado a filtragem manual



Legenda usada em (b): solo (marrom), edificação (laranja), vegetação (verde) pontos não classificados (cinza). O polígono vermelho representa o recorte utilizado para o processamento dos pontos na metodologia proposta.

Fonte: Autor (2017)

O processamento desta área permitiu gerar os resultados apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Número de segmentos obtidos pelo processamento (Parque do Povo)

		P_{dm}			
		1 m	2 m	3 m	4 m
P_b	0%	2491	549	280	193
	10%	2010	487	252	174
	20%	1703	427	238	162
	30%	1485	401	222	152

Fonte: Autor (2017)

Na Tabela 10 são representados os resultados obtidos após a aplicação do pós-processamento.

Tabela 10 - Número de indivíduos e aglomerados obtidos pelo pós-processamento (Parque do Povo)

		P_{dm}															
		1 m				2 m				3 m				4 m			
P_b	0%	151	181	215	330	135	142	159	172	117	125	132	146	107	113	118	126
	10%	136	142	162	192	106	116	124	138	96	100	108	116	84	86	92	96
	20%	101	113	126	146	82	92	98	109	76	79	84	93	69	75	77	82
	30%	87	93	99	109	78	83	85	90	65	67	71	72	60	61	61	62
		5%	10%	15%	20%	5%	10%	15%	20%	5%	10%	15%	20%	5%	10%	15%	20%
		P_{pc}															

Fonte: Autor (2017)

Apresentam-se, nas Tabela 11 e Tabela 12, os indicadores de acurácia temática, completeza e *F-Score* para a seleção de indivíduos arbóreos e para a seleção de aglomerados, respectivamente.

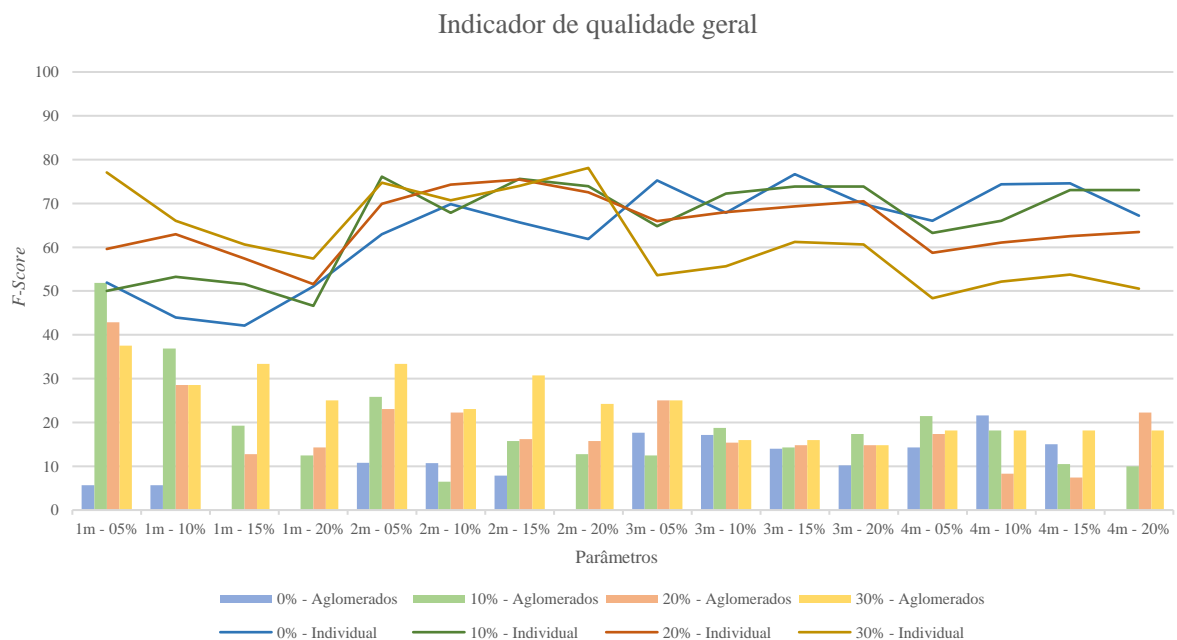
5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesta seção são discutidos e analisados os resultados obtidos pela aplicação da metodologia proposta, apresentada no capítulo anterior. Vale ressaltar, que os resultados foram analisados em separado para cada uma das áreas de estudo utilizadas.

5.1 Área central de Presidente Prudente

Quando se trata da região central, a metodologia proposta apresentou um valor médio de *F-Score* de 64,28% para a seleção de indivíduos arbóreos. A Figura 24 exibe os resultados do índice de qualidade geral, *F-Score*, obtidos para cada configuração utilizada para ambos objetos de interesse: indivíduos arbóreos (linhas) e aglomerados (coluna). Os parâmetros apresentados na abscissa são: distância mínima (P_{dm}) e perímetro comum (P_{pc}), respectivamente, enquanto que o parâmetro de *buffer* (P_b) é responsável por dividir as colunas e linhas em uma única combinação de P_{dm} e P_{pc} .

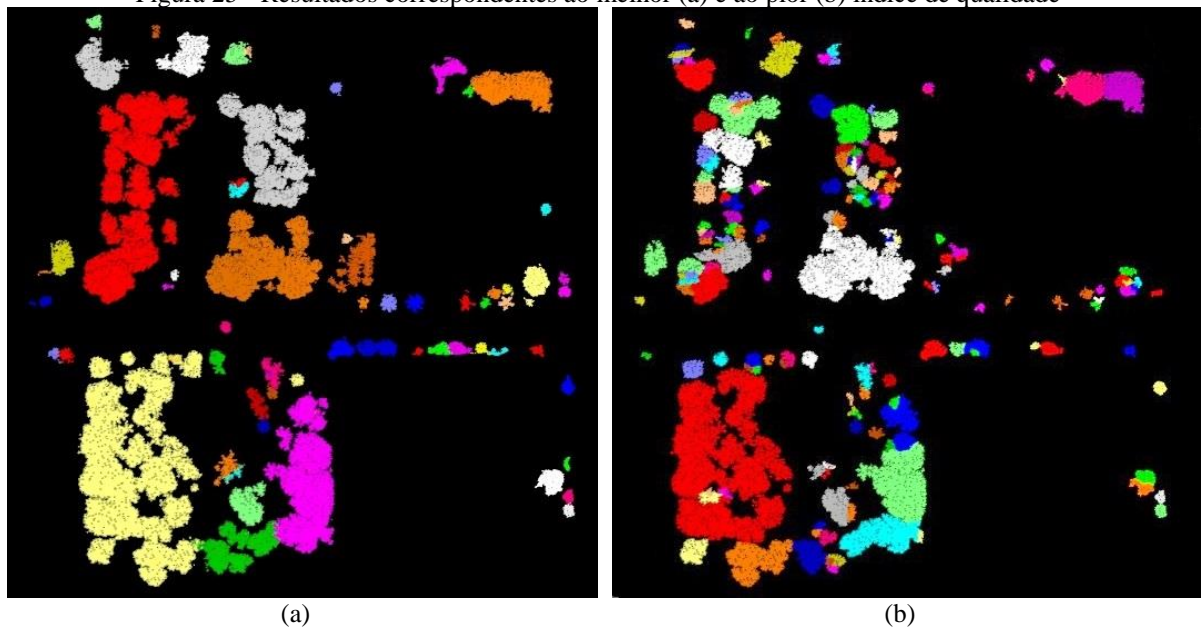
Figura 24 - *F-Score* para a delimitação de indivíduos arbóreos (linhas) e aglomerados (colunas) – Região Centro



Fonte: Autor (2017)

Em se tratando da extração de indivíduos arbóreos, o melhor e o pior dos resultados são apresentados na Figura 25, sendo o melhor resultado, com *F-Score* de 78,10%, obtido por meio da seguinte configuração de parâmetros: 2 m, 30% e 20% para P_{dm} , P_b e P_{pc} , respectivamente. O pior resultado, com *F-Score* de 42,11%, foi obtido quando os seguintes parâmetros foram utilizados: 1 m, 0% e 15%.

Figura 25 - Resultados correspondentes ao melhor (a) e ao pior (b) índice de qualidade

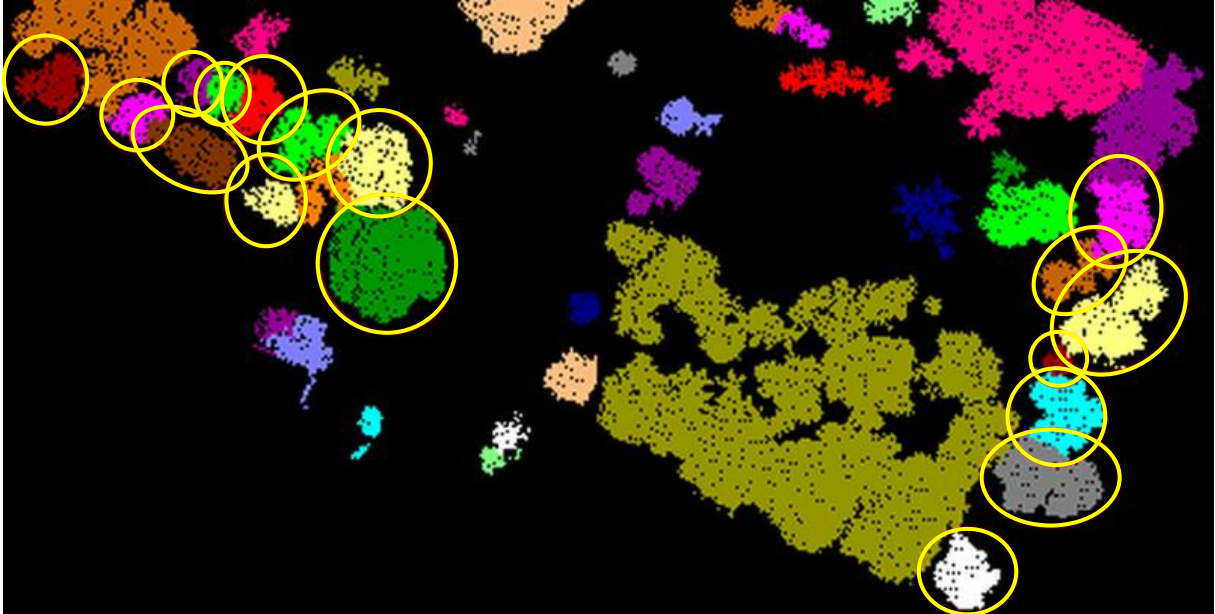


Fonte: Autor (2017)

A partir da Figura 25 (b) e dos resultados apresentados na Tabela 1, pode-se observar que quando valores restritivos (menores valores de P_{dm} , P_b e P_{pc}) ao processo de segmentação são utilizados, o número de segmentos obtidos tende a ser alto, extrapolando, em muito, o número de árvores da área. Desta forma, o pós-processamento busca realizar a fusão destes segmentos que foram superfragmentados no processamento, de modo a reconstruir as árvores por inteiro. Contudo, nem sempre este processo é capaz de realizar esta reconstrução de forma eficiente, resultando assim em áreas com grau de completude e acurácia temática baixas, onde o número de indivíduos encontrados é inferior ao número de indivíduos existentes.

Na extração dos aglomerados, o melhor resultado apresentou um *F-Score* de 51,85%, por meio dos parâmetros: 1 m, 10% e 5%, para P_{dm} , P_b e P_{pc} , respectivamente. Contudo, os resultados obtidos pela segmentação de aglomerados podem ser pessimistas em alguns casos, podendo resultar em indicadores de qualidade geral baixos. Porém, ao analisar o conjunto de dados, pode-se notar que alguns indivíduos arbóreos de aglomerados foram segmentados de forma correta, mesmo apresentando alta sobreposição com os indivíduos vizinhos, como mostra a Figura 26. Isto faz com que o número de segmentos encontrados, e que caracterizam áreas de aglomerados, aumente, implicando em um maior número de elementos caracterizados como Falso Positivos e, em consequência disso, o índice de acurácia temática é reduzido.

Figura 26 - Destaque para alguns dos indivíduos arbóreos extraídos de aglomerados. Os círculos e elipses amarelos caracterizam árvores individuais que se conectam a um aglomerado, mas foram extraídas de forma individual



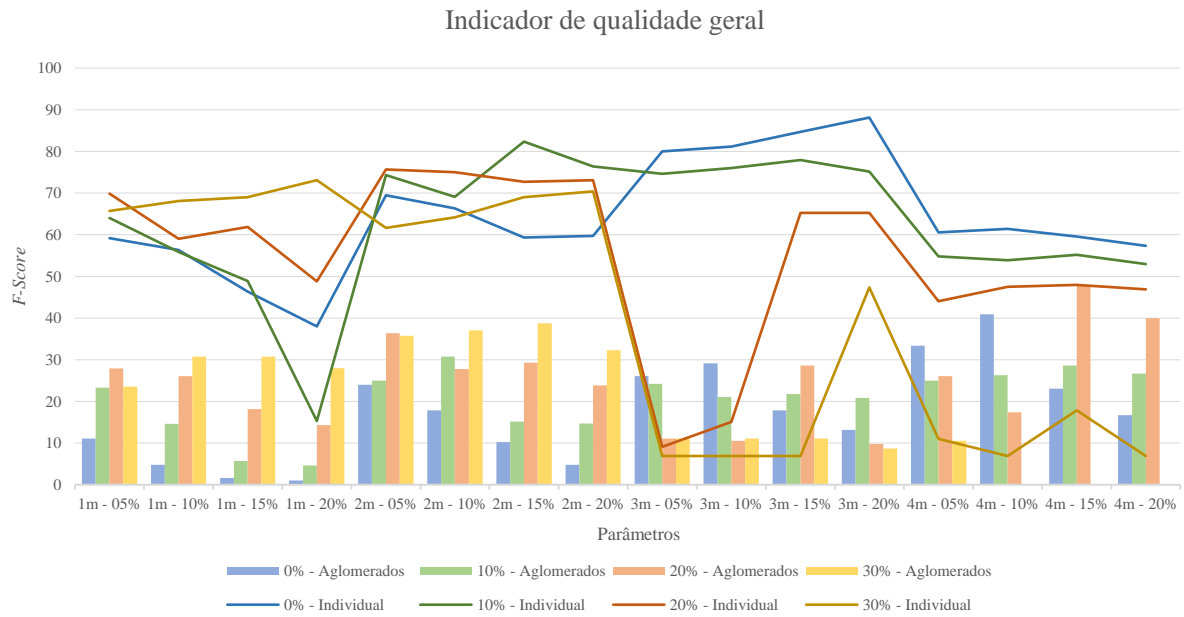
Fonte: Autor (2017)

Quando se analisa o pior resultado para a detecção de aglomerados, tem-se que diversas configurações resultaram em 0%, ou seja, nenhum aglomerado foi recuperado pelo processo de reagrupamento de fragmentos, seja pela inclusão de indivíduos ao aglomerado ou pelo não reagrupamento total do mesmo.

5.2 UNESP

O indicador médio de qualidade dos resultados obtidos, utilizando a área de estudo do campus da UNESP de Presidente Prudente, foi de 79,82%. Os resultados obtidos para as diferentes configurações são indicados na Figura 27, onde as linhas representam os resultados para a delimitação de árvores isoladas e as colunas para aglomerados.

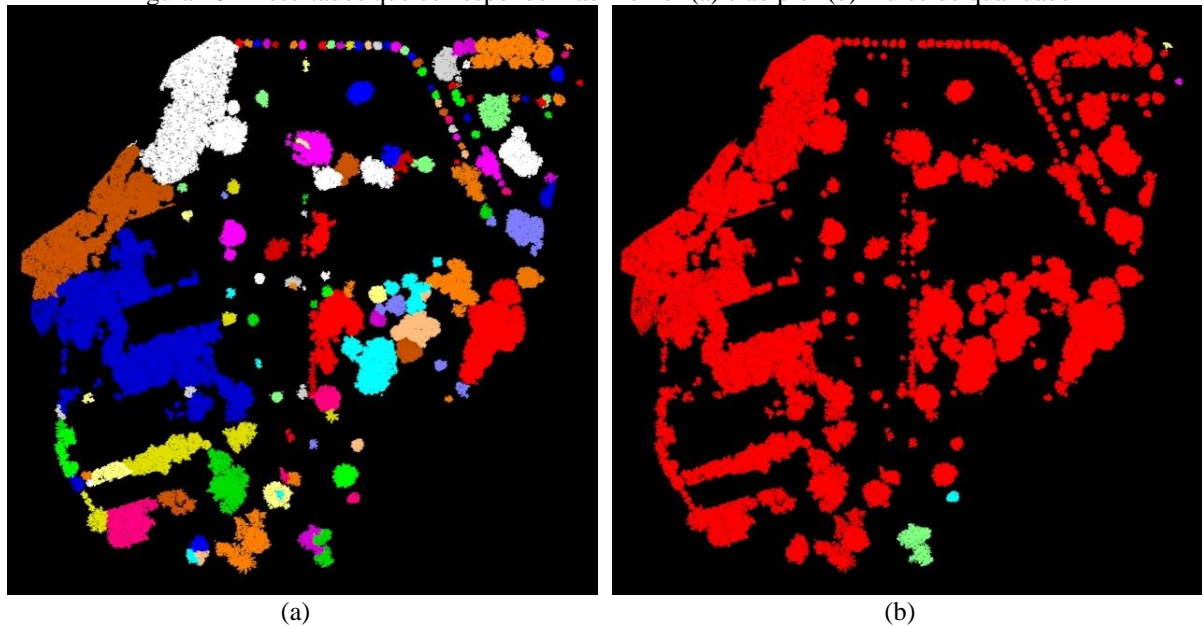
Figura 27 - *F-Score* para a delimitação de indivíduos arbóreos (linhas) e aglomerados (colunas) - UNESP



Fonte: Autor (2017)

O melhor resultado, *F-Score* de 88,14%, foi obtido por meio da configuração: 3 m, 0% e 20%, enquanto que o pior, de 6,90%, foi obtido por diversas configurações de parâmetros, sendo mais frequentes ao considerar P_b de 30% e P_{dm} maiores que 3 m. O melhor resultado e um dos piores resultados são apresentados na Figura 28.

Figura 28 - Resultados que correspondem ao melhor (a) e ao pior (b) índice de qualidade



Fonte: Autor (2017)

Ao analisar a Figura 28 (a) percebe-se que as árvores isoladas e plantadas em linha foram selecionadas corretamente pelo algoritmo. Na Figura 28 (b), observa-se que o número de segmentos encontrados foi reduzido drasticamente. Isso pode ter ocorrido devido a

utilização de polígonos convexos, que aliado a utilização de um P_{dm} maior e com um valor de P_b que amplifica a área de atuação desse limiar, tornou possível que árvores vizinhas, e independentes, fossem consideradas como um único indivíduo. Desta forma, ao realizar o processo de reagrupamento, e considerando que a geração de polígonos convexos é iterativa, este polígono pode acabar por englobar outros segmentos que originalmente seriam considerados como indivíduos arbóreos.

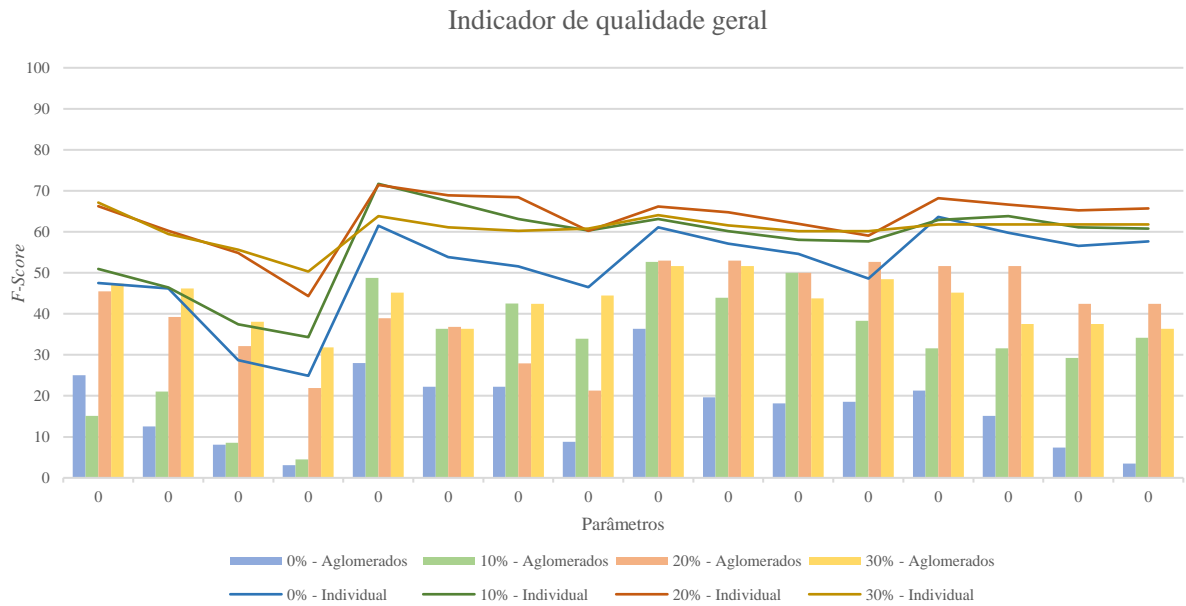
Além disso, a partir da Tabela 7, nota-se que quando se aumenta o valor do parâmetro P_b , os índices gerais de qualidade são reduzidos. Aliado a este aumento, quando se incrementa o valor de P_{dm} , os indicadores apresentam uma ligeira piora, o que indica que os indivíduos arbóreos passam a ser fundidos quando são considerados valores maiores de P_b e P_{dm} , formando, assim, aglomerados.

A partir da imagem óptica mostrada na Figura 11 (b), nota-se que a área do campus da UNESP apresenta grandes aglomerados de diferentes complexidades e distribuição. Quando associada esta informação aos indicadores de qualidade descritos na Tabela 8, observa-se que os melhores resultados para o *F-Score*, considerando as diferentes configurações, variam em torno de 39%. Sendo o melhor resultado, de 48%, obtido com parâmetros de: 4 m, 20%, e 15%, o que demonstra a dificuldade em delimitar grandes aglomerados sem realizar a integração de indivíduos menores aos mesmos. De forma similar ao apresentado na área central, algumas configurações de parâmetros, Tabela 8, não resultaram nenhum aglomerado, seja pela não reconstrução ou pela fusão de indivíduos aos aglomerados.

5.3 Parque do povo

O recorte do Parque do povo, utilizado como área de estudo e como exibido na imagem da Figura 11 (c), é o que apresenta maior número de indivíduos arbóreos e aglomerados, proporcionalmente distribuídos ao longo da área escolhida. Por esta razão, a mesma apresenta seus aglomerados ao longo de todo o recorte, bem como indivíduos arbóreos entre os aglomerados. Quando se diz respeito à seleção de indivíduos e aglomerados, esta área de estudo resultou em valores de *F-Score* médios de 68,47% e 48,39%, respectivamente. Os valores de qualidade obtidos nas diferentes configurações utilizadas são apresentados na Figura 28.

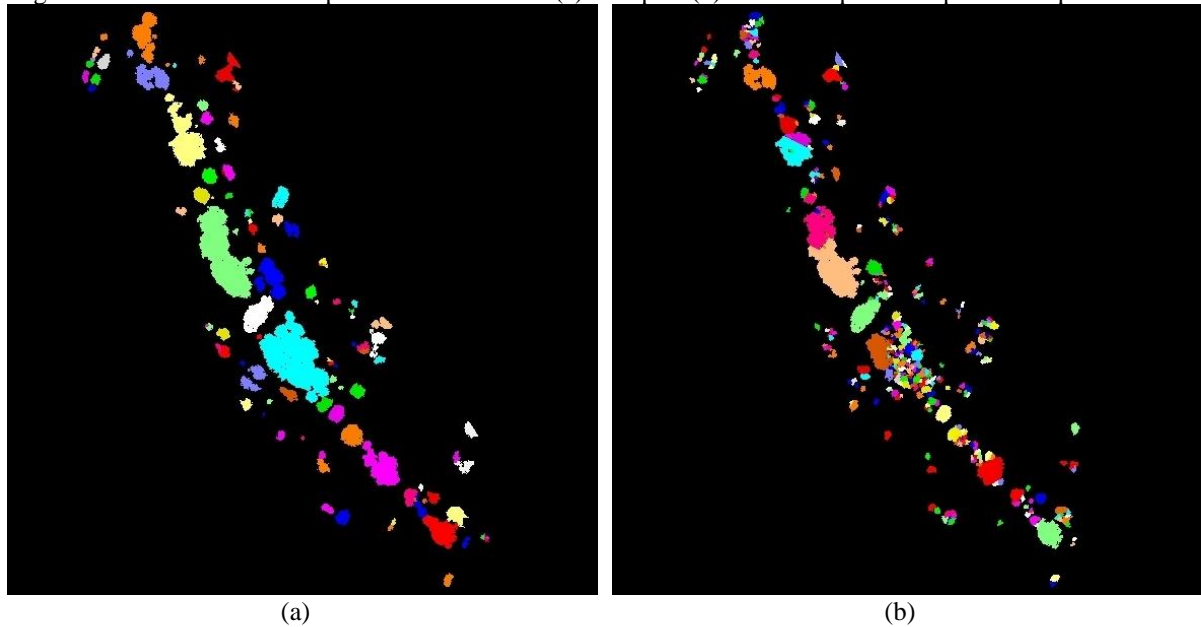
Figura 29 - *F-Score* para a delimitação de indivíduos arbóreos (linhas) e aglomerados (colunas) – Parque do Povo



Fonte: Autor (2017)

Para a seleção de indivíduos arbóreos, o melhor resultado, de 71,70%, foi obtido utilizando os seguintes valores de parâmetros: 2 m, 10% e 5%; enquanto o pior resultado, de 24,89%, foi obtido com: 1 m, 0% e 20%, como se vê na Figura 30 (a) e (b), respectivamente.

Figura 30 - Resultados correspondentes ao melhor (a) e ao pior (b) índice de qualidade para o Parque do Povo



Fonte: Autor (2017)

Da mesma forma que as demais áreas de estudo utilizadas, o pior resultado foi obtido quando se utilizou limiares de segmentação menores, limitando assim o alcance das áreas de atuação e, por consequência disso, aumentando o número de segmentos criados.

Quando estes são submetidos ao pós-processamento, o reagrupamento pode não ser eficaz o suficiente, resultando assim em um número de segmentos muito maior que o existente. Assim, o índice de acurácia temática é reduzindo, influenciando o valor do indicador de qualidade geral *F-Score*.

5.4 Síntese dos resultados

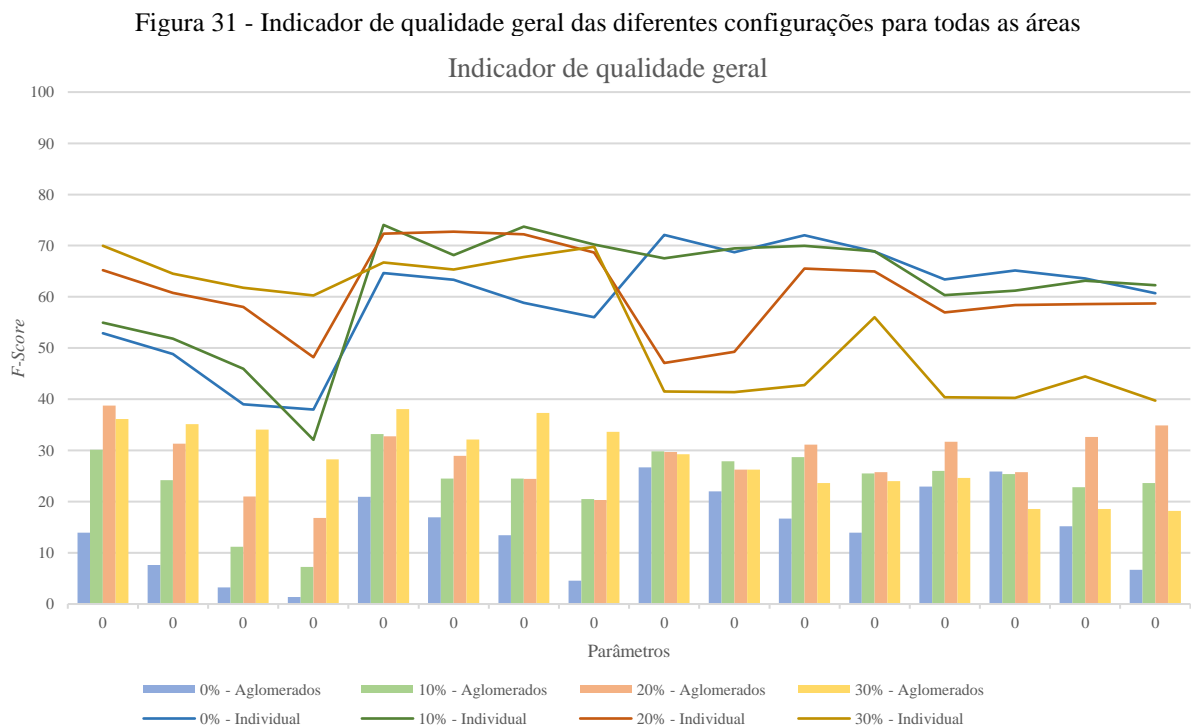
Considerando todas as áreas de estudo utilizadas nesta pesquisa, os resultados médios de *F-Score* são apresentados na Tabela 13. Quando se trata da delimitação de indivíduos arbóreos, nota-se que ao considerar uma variação crescente de P_b , para valores pequenos de P_{dm} , o índice de qualidade geral do segmentador é ligeiramente melhorado, contudo, ao observar um cenário contrário, onde os valores tolerados de P_{dm} são maiores, considerar uma variação crescente de P_b implica em uma redução no índice de qualidade geral. Isso indica que, ao considerar grandes áreas de atuação (maior P_{dm}), a necessidade de utilizar valores altos de P_b é reduzido, uma vez que ambos os parâmetros têm ações equivalentes. Em contrapartida, na delimitação de aglomerados, o resultado obtido é melhorado quando os valores de P_b e P_{dm} utilizados são incrementados, atingindo seu ponto de melhor resultado em 30% e 2 m, respectivamente.

Tabela 13 - Indicador de qualidade (*F-Score*) médio das amostras

		Indivíduo arbóreo				Aglomerado				
P_{dm}	1 m	52,86	54,97	65,23	69,98	13,91	30,11	38,74	36,13	5%
		48,82	51,84	60,76	64,53	7,63	24,18	31,29	35,16	10%
		39,04	45,96	58,03	61,75	3,23	11,17	21,03	34,07	15%
		37,98	32,08	48,22	60,28	1,36	7,22	16,82	28,27	20%
	2 m	64,64	74,05	72,34	66,74	20,94	33,20	32,78	38,07	5%
		63,33	68,15	72,73	65,33	16,93	24,53	28,95	32,16	10%
		58,86	73,71	72,21	67,76	13,46	24,50	24,46	37,30	15%
		56,01	70,23	68,63	69,78	4,53	20,48	20,29	33,65	20%
	3 m	72,10	67,53	47,08	41,52	26,70	29,79	29,68	29,24	5%
		68,73	69,45	49,27	41,37	21,97	27,90	26,28	26,24	10%
		72,01	69,94	65,52	42,76	16,69	28,67	31,13	23,62	15%
		68,87	68,90	64,94	56,04	13,95	25,51	25,73	24,00	20%
	4 m	63,41	60,32	56,98	40,38	22,97	26,00	31,70	24,62	5%
		65,17	61,23	58,42	40,29	25,88	25,36	25,78	18,56	10%
		63,59	63,14	58,57	44,47	15,16	22,79	32,61	18,56	15%
		60,74	62,28	58,69	39,73	6,70	23,60	34,88	18,18	20%
		0%	10%	20%	30%	0%	10%	20%	30%	
P_b										

Fonte: Autor (2017)

Quando são analisadas as variações consideradas em P_{dm} , os resultados da segmentação de indivíduos, em geral, são melhores quando P_{dm} é definido como 2 m e, conforme este valor é incrementado, os resultados apresentam um decréscimo. Para a delimitação de aglomerados, uma situação semelhante é descrita, sendo possível obter os melhores resultados, considerando somente a variação de P_{dm} , com os valores de 1 e 2 m. A Figura 31 apresenta os dados descritos na Tabela 13 de modo a visualizar o comportamento dos dados, tanto na detecção de indivíduos, representados nas linhas, como na detecção de aglomerados, representados nas colunas.



Fonte: Autor (2017)

De modo geral, a configuração de parâmetros que apresentou melhor resultado, quando se buscou a delimitação simultânea de indivíduos arbóreos e aglomerados, foi quando os seguintes parâmetros foram utilizados: 2 m, 10% e 5%, com um *F-Score* médio de 53,63%. Já a que apresentou o pior resultado, na detecção simultânea foi obtido pelos parâmetros: 1 m, 10% e 20%, com *F-Score* médio de 19,64%.

Os parâmetros que apresentaram melhores e piores resultados são destacados na Tabela 14, além das configurações de parâmetros que resultaram no melhor e pior resultado na delimitação simultânea dos dois objetos de estudo. Vale ressaltar que os valores de Acurácia temática (AT), Correteza (C) e *F-Score* (FS) apresentados para a delimitação de ambos os

objetos de interesse são dados pela diferença absoluta obtida para a detecção de cada um em separado.

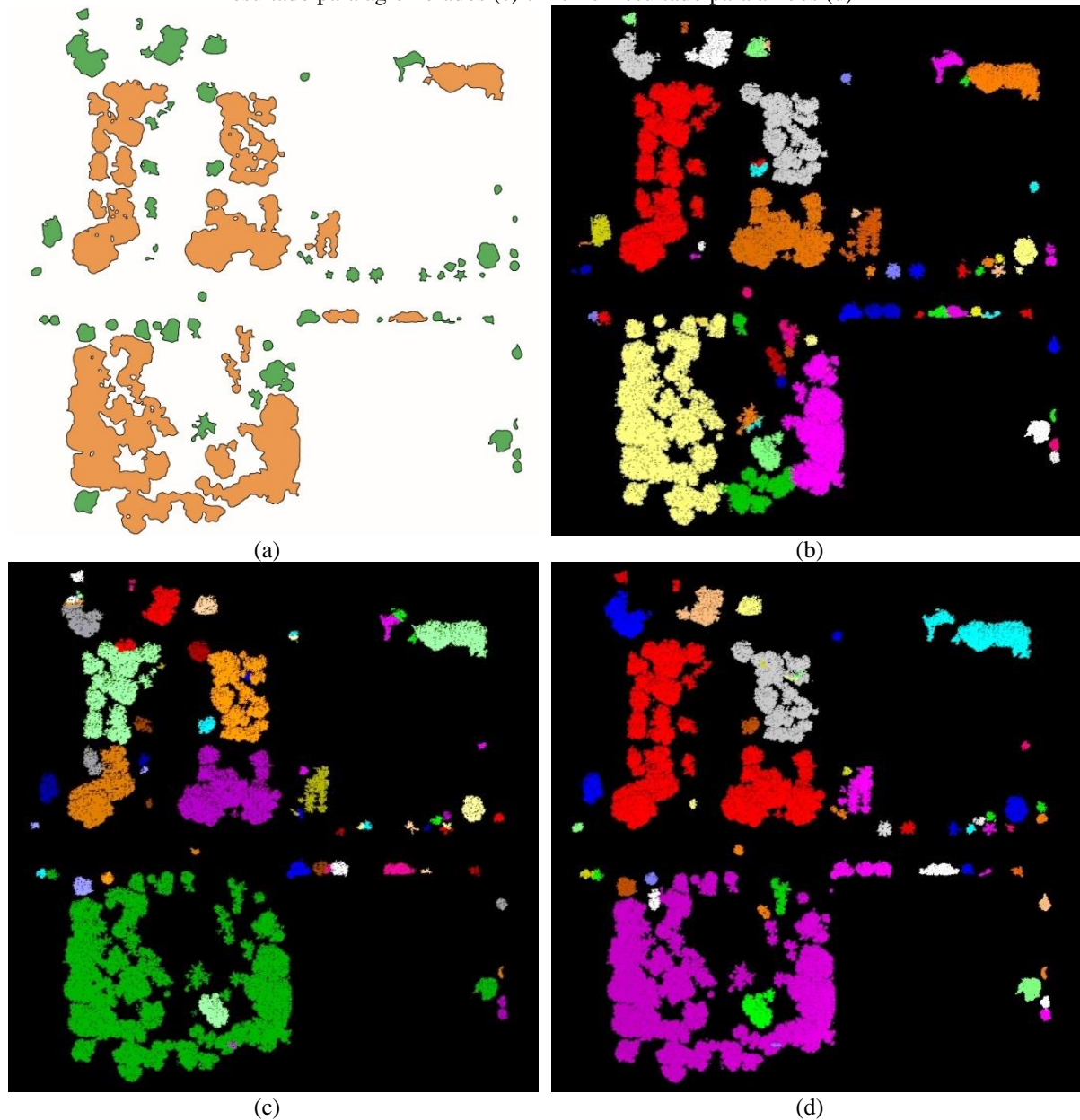
Tabela 14 - Melhores e piores indicadores de qualidade para as três áreas considerando a delimitação de indivíduos arbóreos, aglomerados e ambos simultaneamente

Objeto	Situação	Configuração ¹	AT	C	FS	Área
Indivíduo arbóreo	Melhor	2 m, 30% e 20%	87,23%	70,69%	78,10%	Centro
	Pior	1 m, 0% e 15%	37,33%	48,28%	42,11%	
	Melhor	3 m, 0% e 20%	83,87%	92,86%	88,14%	UNESP
	Pior	4 m, 30% e 10%	100,00%	3,57%	6,90%	
	Melhor	2 m, 10% e 5%	68,67%	75,00%	71,70%	Parque do povo
	Pior	1 m, 0% e 20%	18,79%	36,84%	24,89%	
Aglomerado	Melhor	1 m, 10% e 5%	63,64%	43,75%	51,85%	Centro
	Pior	1 m, 0% e 15%	0,00%	0,00%	0,00%	
	Melhor	4 m, 20% e 15%	66,67%	37,50%	48,00%	UNESP
	Pior	4 m, 30% e 10%	0,00%	0,00%	0,00%	
	Melhor	3 m, 20% e 10%	56,25%	50,00%	52,94%	Parque do povo
	Pior	1 m, 0% e 20%	1,69%	16,67%	3,06%	
Ambos	Melhor	1 m, 30% e 5%	59,87% ²	26,29% ³	57,29% ⁴	Centro
	Pior	1 m, 0% e 15%	37,33% ²	48,28% ³	21,05% ⁴	
	Melhor	2 m, 20% e 5%	52,21% ²	29,17% ³	56,02% ⁴	UNESP
	Pior	4 m, 30% e 10%	100,00% ²	3,57% ³	3,45% ⁴	
	Melhor	2 m, 10% e 5%	25,20% ²	19,44% ³	60,24% ⁴	Parque do povo
	Pior	1 m, 0% e 20%	17,11% ²	20,18% ³	13,98% ⁴	

Legenda: ¹ P_{dm}, P_b e P_{pc}; ² Considere: AT_{ind} – AT_{agl}; ³ Considere: C_{ind} – C_{agl}; ⁴ Considere: (FS_{ind} + FS_{agl})/2
Fonte: Autor (2017)

Destaca-se, a partir dos resultados apresentados anteriormente, que a área de estudo que apresenta melhor resultado, quando se considera a detecção simultânea dos objetos de interesse, é o Parque do Povo. Neste sentido, é válido observar que, em termos absolutos, esta área foi a que apresentou menor discrepância entre os indicadores de qualidade parcial (acurácia temática e completeza). Além disso, nota-se que os valores encontrados para as diferenças destes indicadores nas três áreas de estudos foram positivos, o que indica a superioridade do método em selecionar indivíduos arbóreos a aglomerados. A Figura 32 apresenta uma síntese dos melhores casos para a área de estudo do centro, quando se objetivou a detecção de indivíduos, aglomerados em separado e também simultaneamente. Em (a) é apresentado o Mapa de Referência para esta área. Nos Apêndices A, B e C podem ser vistos, com mais detalhes, os três mapas de referências gerados manualmente e utilizados na análise de qualidade.

Figura 32 - Centro de Presidente Prudente: Mapa de referência (a), melhor resultado para indivíduos (b), melhor resultado para aglomerados (c) e melhor resultado para ambos (d)



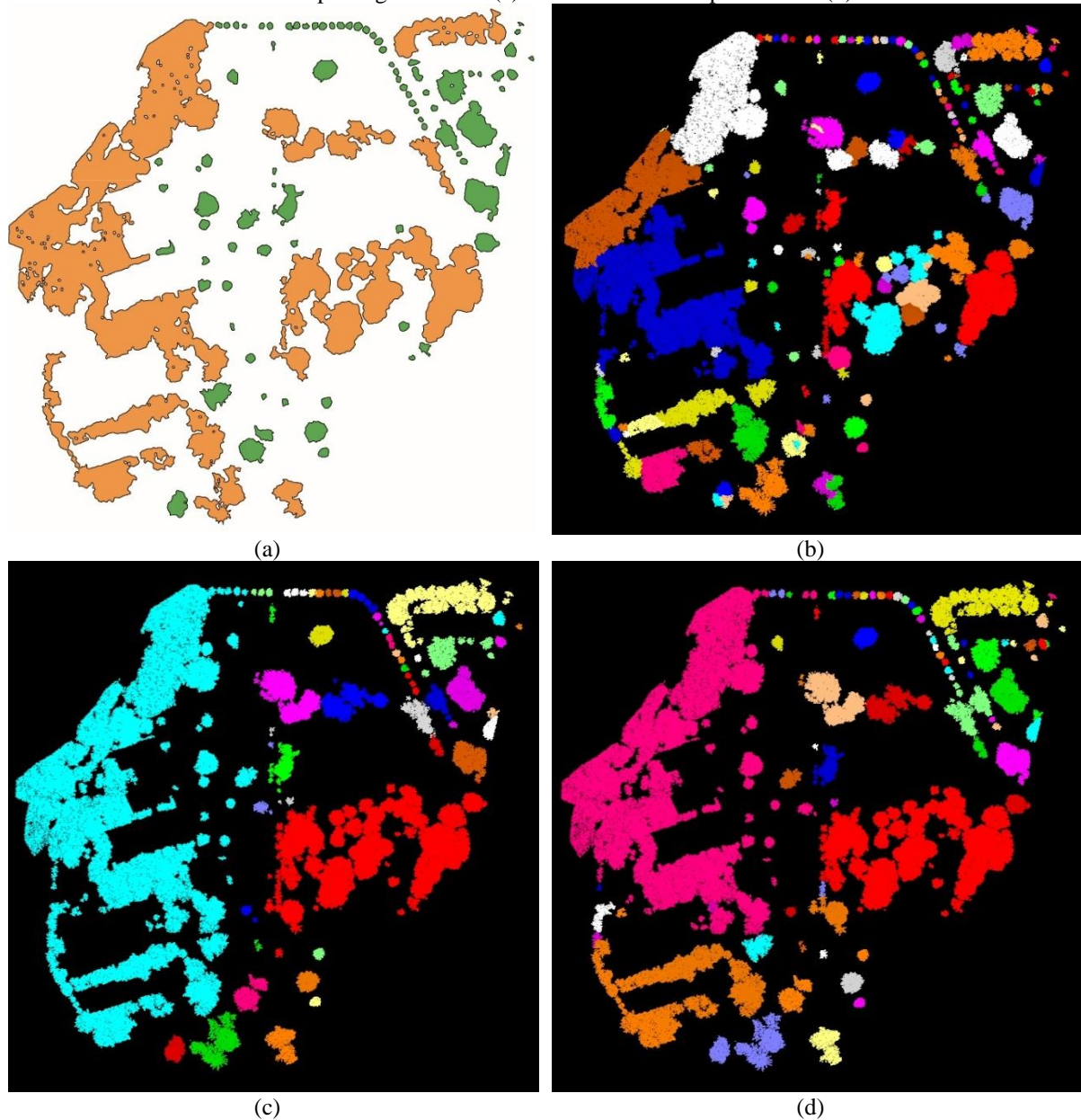
Parâmetros utilizados: (b) 2 m, 30% e 20%; (c) 1 m, 10% e 5%; e (d) 1 m, 30% e 5%.

Fonte: Autor (2017)

Observando o melhor resultado para a seleção de indivíduos, Figura 32 (b), nota-se o excesso de fragmentos não reagrupados em aglomerados. Em contrapartida, quando se analisa a seleção de aglomerados, em (c), o caso contrário é notável, seja pelo excesso de fragmentos de indivíduos não reconstruídos, pela fusão de indivíduos a aglomerados ou indivíduos vizinhos.

A Figura 33 apresenta a área de estudo do campus da UNESP, bem como os melhores resultados para a detecção dos indivíduos, aglomerados e ambos.

Figura 33 - Campus da UNESP/PP: Mapa de referência (a), melhor resultado para indivíduos (b), melhor resultado para aglomerados (c) e melhor resultado para ambos (d)

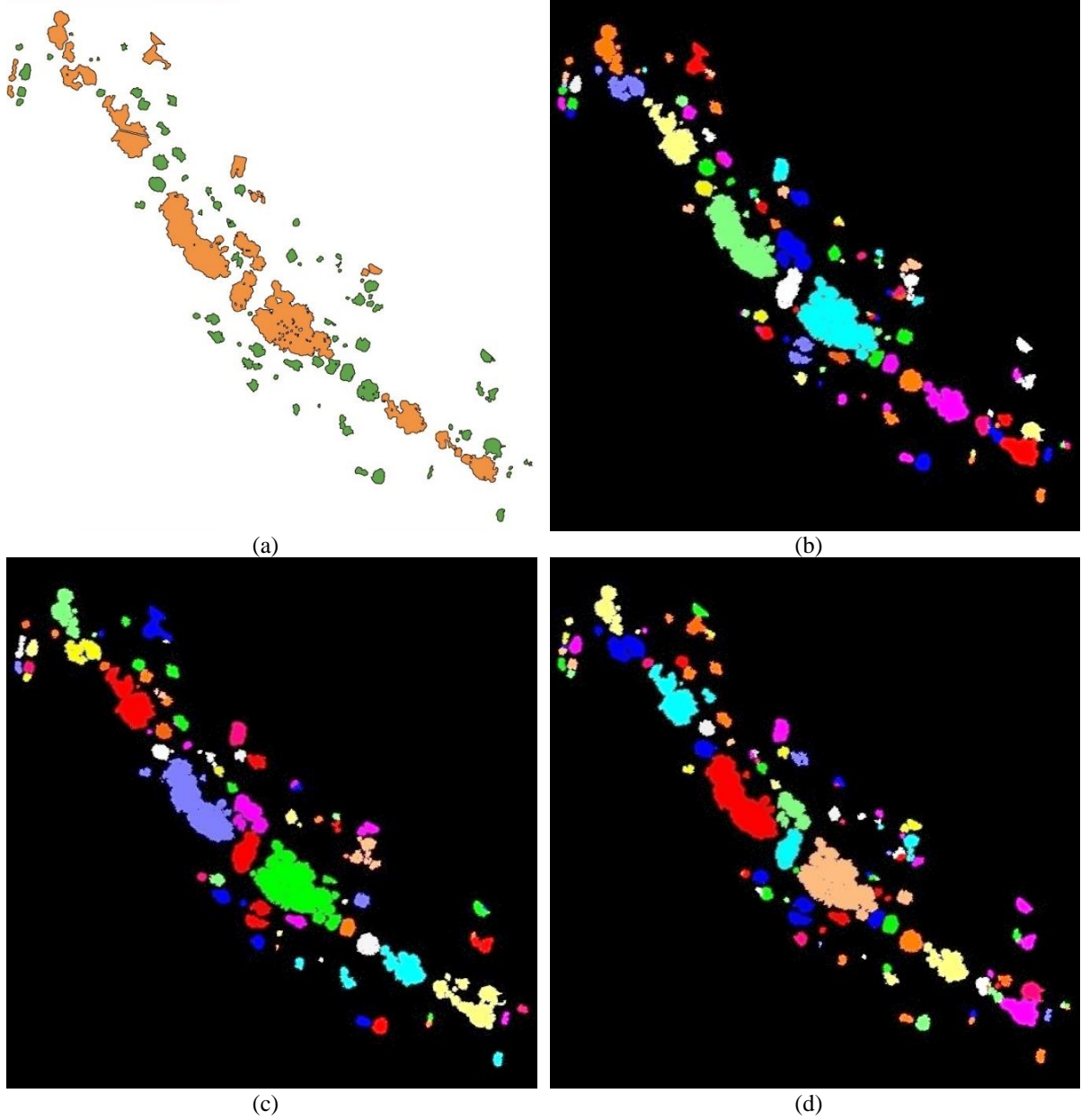


Parâmetros utilizados: (b) 3 m, 0% e 20%; (c) 4 m, 20% e 15%; e (d) 2 m, 20% e 5%.

Fonte: Autor (2017)

Ressalta-se que a configuração que resultou no melhor índice de qualidade geral para a seleção de indivíduos, também resultou em uma super-fragmentação dos aglomerados. Por esta razão, os indivíduos vizinhos, ou que estariam contidos no polígono convexo dos mesmos, foram selecionados corretamente. Na Figura 34 representa-se a área de estudo do Parque do povo, bem como os melhores resultados para a detecção dos indivíduos, aglomerados e ambos.

Figura 34 - Parque do Povo: Mapa de referência (a), melhor resultado para indivíduos (b), melhor resultado para aglomerados (c) e melhor resultado para ambos (d)



Parâmetros utilizados: (b) 2 m, 10% e 5%; (c) 3 m, 20% e 10%; e (d) 2 m, 10% e 5%.

Fonte: Autor (2017)

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A partir da revisão do estado da arte referente a extração de árvores por meio de dados lidar obtidos por sistemas aerotransportados, foi possível notar que a maior parte dos trabalhos utilizam dados reamostrados para uma malha regular. Além disso, observou-se que as pesquisas são realizadas, em sua maioria, para regiões do hemisfério norte, o qual predominam florestas boreais com tipos de vegetação específicas, como coníferas, por exemplo. Desta forma, foi proposta uma metodologia de extração de indivíduos arbóreos e aglomerados, que foi aplicada a um cenário de vegetação heterogênea, em ambiente urbano, no Brasil.

Na proposta metodológica apresentada a nuvem de pontos 3D obtida por sistemas lidar aerotransportados foi utilizada em sua estrutura original, ou seja, em uma malha de pontos irregular. Ademais, a metodologia propôs a utilização de polígonos convexos na delimitação das copas. Em síntese, a metodologia pode ser dividida em três etapas: pré-processamento; processamento e pós-processamento. A primeira etapa consiste na realização de uma classificação, filtragem e normalização da nuvem de pontos. A segunda realiza a ordenação dos pontos com o objetivo de aplicar uma segmentação hierárquica, do ponto mais alto para o mais baixo, gerando fragmentos de vegetação. Para realizar a segmentação, dois limiares, distância mínima e *buffer*, devem ser definidos pelo usuário, de modo a orientar o processo de segmentação. A terceira etapa, pós-processamento, buscou reagrupar os fragmentos a fim de reconstruir as árvores e aglomerados que eventualmente foram superfragmentados na etapa anterior. Para isso, um terceiro limiar, de perímetro comum, foi introduzido de modo a verificar qual a magnitude da sobreposição entre os polígonos convexos dos diferentes segmentos vizinhos. Por fim, algumas informações dendrométricas foram extraídas dos segmentos criados, tais como: área da copa projetada no plano horizontal; altura média da árvore; e raio médio da copa, por exemplo.

Para avaliar a metodologia desenvolvida, foram utilizadas três áreas de estudo com características estruturais da vegetação diferentes. Os limiares considerados no método foram testados com o propósito de verificar a sensibilidade dos mesmos para as três áreas de estudo. Desta forma, cada um dos limiares foi variado em quatro valores diferentes, resultando em um total de 64 combinações de configuração para cada área de estudo utilizado. Os segmentos obtidos foram comparados com o total de indivíduos e aglomerados de cada área, que foram contados de forma manual, gerando mapas de referência para cada área. Com isso,

foi possível obter indicadores de qualidade que demonstrassem o nível de acurácia temática, completeza e *F-Score*.

Considerando as três áreas de estudo em conjunto, a metodologia proposta resultou em um valor de *F-Score* máximo de 53,63%, quando buscou-se a seleção simultânea de indivíduos arbóreos e aglomerados. Já quando o objetivo foi realizar a extração de indivíduos arbóreos, o maior resultado obtido foi de 74,05%, enquanto que na extração de aglomerados o maior valor de *F-Score* foi 38,74%.

Quando os resultados das três áreas de estudos foram analisados isoladamente, nota-se que a área de estudo que apresentou melhor resultado foi a do parque urbano. Neste caso, obteve-se o valor máximo de *F-Score* de 60,24% considerando a média deste indicador para indivíduos e aglomerados, simultaneamente. Por outro lado, para a detecção apenas de aglomerados este valor foi de 52,94%. Somente a detecção de indivíduos foi melhor em outra área de estudo com *F-Score* de 88,14%, para o campus da UNESP. Os melhores resultados no Parque do Povo provavelmente se justifiquem pela disposição das árvores e aglomerados e a dimensão dos mesmos, uma vez que os aglomerados eram de média proporção e não apresentavam grandes reentrâncias, o que poderia ter resultado em um super-reagrupamento. Assim, ao se considerar a área de estudo a qual deseja-se aplicar a metodologia, é necessário que se estude, *a priori*, as melhores opções de configuração dos limiares utilizados.

De forma geral, foi possível perceber que a utilização de polígonos convexos na extração de indivíduos arbóreos, em áreas que contenham grandes aglomerados com grandes reentrâncias, resulta em valores menores de *F-Score*. Isso se deve ao fato de que o polígono convexo não é capaz de representar áreas com reentrâncias, aumentando a área dos aglomerados em algumas situações, prejudicando assim a etapa de reagrupamento. Todavia, quando se trata da extração de indivíduos arbóreos, a utilização da mesma metodologia se mostrou eficaz, como pôde-se notar pelos valores de *F-Score* obtidos.

Ao comparar os resultados obtidos, pela metodologia proposta, com os apresentados pelas referências utilizadas, nota-se que os melhores resultados para extração de indivíduos, 78%, 88% e 72%, nas três diferentes áreas, não se apresentam obstantes. Em Lu et al. (2014), os autores determinam os indivíduos com qualidade geral de 90%; Véga et al. (2014) apresentam um resultado com qualidade de 82%; e Mongus e Zalik (2015) indicam um valor de 66,2% como melhor indicador de qualidade geral de uma das áreas de estudo utilizadas, sendo relevante ressaltar que estes resultados correspondem a aplicação das respectivas metodologias em florestas de coníferas. Esta comparação com alguns resultados da literatura,

embora alguns deles tenham sido obtidos a partir de dados de florestas com uma distribuição mais regular e também de espécies de geometria mais uniforme, permite considerar que a hipótese inicialmente colocada se confirma.

Quando se pensa no desenvolvimento de ferramentas para a automação de processos como: contagem e verificação da altura de árvores, estimativa de área verde, e monitoramento de abate ou poda ilegal; metodologias como a proposta neste trabalho se apresentam como uma alternativa. Deste modo, pode-se considerar que ao aliar o procedimento proposto a uma coleta sistemática de dados lidar em um sistema de informação geográfica, nas quais outros dados são disponíveis, é possível o monitoramento sistemático da vegetação em áreas urbanas, contribuindo para o planejamento de ações por parte do poder público.

Para trabalhos futuros recomenda-se: a adaptação da metodologia para utilização de polígonos côncavos e convexos, com base num processo adaptativo de análise da forma dos objetos de interesse; avaliar o reflexo do uso de outros limiares, para regiões de diferentes características; bem como avaliar o efeito da mudança da densidade da nuvem de pontos.

REFERÊNCIAS

- ABREU, L. V. de. **Avaliação da escala de influência da vegetação no microclima por diferentes espécies arbóreas**. 2008. 154 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas, 2008.
- ALDRED, A. H; BONNOR, G. M. **Application of airborne lasers to forest surveys**. 1985.
- ALVES, M. V. G. **Estimativa de Variáveis Florestais com Perfilamento a LASER (lidar)**. 2010. 119 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba, 2010.
- AXELSSON, P. Processing of laser scanner data-methods and algorithms. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 53, p. 1-6, 1998.
- BRADEN, B. The surveyor's area formula. **The College Mathematics Journal**, v. 17, n. 4, p. 326-337, 1986.
- BRANDTBERG, T.; WARNER, T. A.; LANDENBERGER, R. E.; MCGRAW, J. B. Detection and analysis of individual leaf-off tree crowns in small footprint, high sampling density lidar data from the eastern deciduous forest in North America. **Remote sensing of Environment**, v. 85, n. 3, p. 290-303, 2003.
- BRETZ, S.; AKBARI, H.; ROSENFELD, A. Practical issues for using solar-reflective materials to mitigate urban heat islands. **Atmospheric environment**, v. 32, n. 1, p. 95-101, 1998.
- CENTENO, J. A. S.; MITISHITA, E. A.; MACHADO, Á. M. L. Stem modeling from terrestrial laser scanning using the block minimum approach. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 3, n. 66/7, 2014.
- CHEN, Q.; BALDOCCHI, D.; GONG, P.; KELLY, M. Isolating individual trees in a savanna woodland using small footprint lidar data. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 72, n. 8, p. 923-932, 2006.
- DALPONTE, M.; COOPS, N. C.; BRUZZONE, L.; GIANELLE, D. Analysis on the use of multiple returns lidar data for the estimation of tree stems volume. **Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, IEEE Journal of**, v. 2, n. 4, p. 310-318, 2009.
- DE BERG, M.; KREVELD, M. V.; OVERMARS, M.; SCHWARZKOPF, O. Computational Geometry: Introduction. In: DE BERG, Mark et al. **Computational Geometry: Algorithms and Applications**. 2. ed. Springer Berlin Heidelberg, Springer, 2000. Cap. 1. p. 1-13.
- DUNCANSON, L. I.; COOK, B. D.; HURTT, G. C.; DUBAYAH, R. O. An efficient, multi-layered crown delineation algorithm for mapping individual tree structure across multiple ecosystems. **Remote Sensing of Environment**, v. 154, p. 378-386, 2014.
- EL-SHEIMY, N. DTM Generalization and Quality Control. In: EL-SHEIMY, N.; VALEO, C.; HABIB, A. **Digital terrain modeling: acquisition, manipulation, and applications**. Boston: Artech House, 2005. Cap. 6. p. 159-178.
- ENCINAS, J. M. I.; SILVA, G. F.; TICCHETTI, I. **Variáveis dendrométricas**. Brasília: Comunicações Técnicas Florestais, 2002. 4 v.
- ENE, L.; NÆSSET, E.; GOBAKKEN, T. Single tree detection in heterogeneous boreal forests using airborne laser scanning and area-based stem number estimates. **International journal of remote sensing**, v. 33, n. 16, p. 5171-5193, 2012.
- FALKOWSKI, M. J.; SMITH, A. M.; HUDAK, A. T.; GESSLER, P. E.; VIERLING, L. A.; CROOKSTON, N. L. Automated estimation of individual conifer tree height and crown diameter via two-dimensional spatial wavelet analysis of lidar data. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 32, n. 2, p. 153-161, 2006.

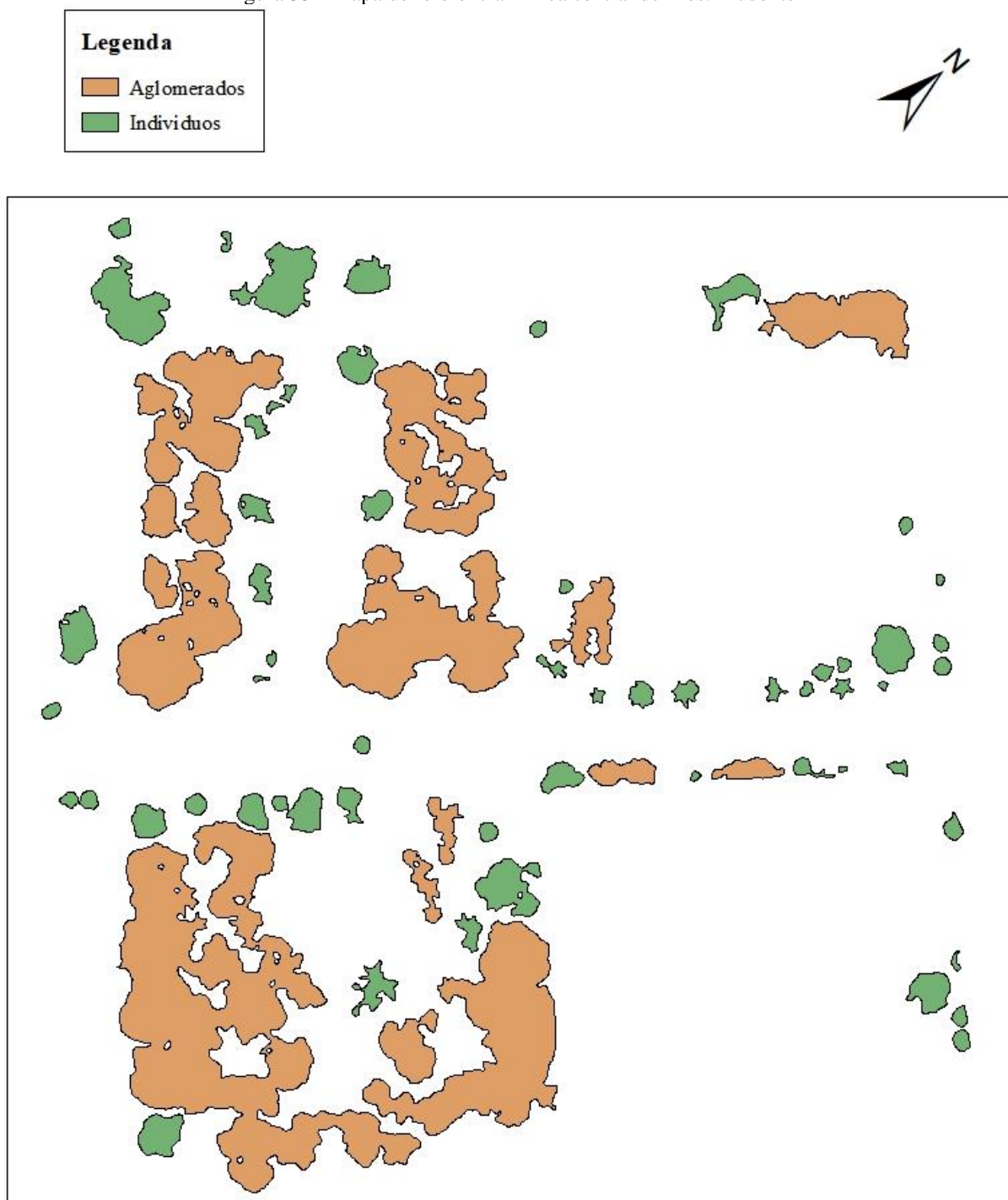
- FERNANDEZ-DIAZ, J. C. Lifting the Canopy Veil. **Imaging Notes: Satellites for Sudan**, Denver, v. 26, n. 2, p.31-34, 2011. Disponível em: <http://www.imagingnotes.com/ee_downloads/INsp2011_web.pdf>. Acesso em: 28 mar. 2016.
- FERNANDEZ-DIAZ, J. C.; CARTER, W. E.; SHRESTHA, R. L.; GLENNIE, C. L. Now you see it... now you don't: Understanding airborne mapping lidar collection and data product generation for archaeological research in Mesoamerica. **Remote Sensing**, v. 6, n. 10, p. 9951-10001, 2014.
- FRANKLIN, W. R. **Pnpoly-point inclusion in polygon test**. 2006. Disponível em <http://www.ecse.rpi.edu/Homepages/wrf/Research/Short_Notes/pnpoly.html> Acesso em: dez. 2016.
- GALO, M. **Indicadores de Qualidade: Fotogrametria Digital**, 2017. 19 f. Notas de aula.
- HAINES, E. Point in polygon strategies. **Graphics gems IV**, v. 994, p. 24-26, 1994.
- HU, B., LI, J., JING, L., JUDAH, A. Improving the efficiency and accuracy of individual tree crown delineation from high-density lidar data. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 26, p. 145-155, 2014.
- HYYPPA, J.; KELLE, O.; LEHIKONEN, M.; INKINEN, M. A segmentation-based method to retrieve stem volume estimates from 3-D tree height models produced by laser scanners. **Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on**, v. 39, n. 5, p. 969-975, 2001.
- International Organization for Standardization (ISO). **Geographic Information —Data Quality; ISO 19157:2013**. ISO: Geneva, Suíça, 2013. Disponível em: http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue_ics/catalogue_detail_ics.htm?csnumber=32575 (Ultimo acesso em: 24 de julho 2016).
- JABOYEDOFF, M.; OPPIKOFER, T.; ABELLÁN, A.; DERRON, M. H.; LOYE, A.; METZGER, R.; PEDRAZZINI, A. Use of lidar in landslide investigations: a review. **Natural hazards**, v. 61, n. 1, p. 5-28, 2012.
- JING, L.; HU, B.; LI, J.; NOLAND, T. Automated delineation of individual tree crowns from lidar data by multi-scale analysis and segmentation. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 78, n. 12, p. 1275-1284, 2012.
- KAUFMAN, A. Volume visualization. **The visual computer**, v. 6, n. 1, p. 1-1, 1990.
- KAUFMAN, A.; COHEN, D.; YAGEL, R. Volume graphics. **Computer**, v. 26, n. 7, p. 51-64, 1993.
- KOCH, B.; HEYDER, U.; WEINACKER, H. Detection of individual tree crowns in airborne lidar data. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 72, n. 4, p. 357-363, 2006.
- KWAK, D. A.; LEE, W. K.; LEE, J. H.; BIGING, G. S.; Gong, P. Detection of individual trees and estimation of tree height using lidar data. **Journal of Forest Research**, v. 12, n. 6, p. 425-434, 2007.
- LECKIE, D.; GOUGEON, F.; HILL, D.; QUINN, R.; ARMSTRONG, L.; SHREENAN, R. Combined high-density lidar and multispectral imagery for individual tree crown analysis. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 29, n. 5, p. 633-649, 2003.
- LEE, H.; SLATTON, K. C.; ROTH, B. E.; CROPPER Jr, W. P. Adaptive clustering of airborne lidar data to segment individual tree crowns in managed pine forests. **International Journal of Remote Sensing**, v. 31, n. 1, p. 117-139, 2010.
- LI, W.; GUO, Q.; JAKUBOWSKI, M. K.; KELLY, M. A new method for segmenting individual trees from the lidar point cloud. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 78, n. 1, p. 75-84, 2012.
- LU, X.; GUO, Q.; LI, W.; FLANAGAN, J. A bottom-up approach to segment individual deciduous trees using leaf-off lidar point cloud data. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 94, p. 1-12, 2014.

- MACLEAN, G. A.; KRABILL, W. B. Gross-merchantable timber volume estimation using an airborne LIDAR system. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 12, n. 1, p. 7-18, 1986.
- MARTINS, M. S.; DE CARVALHO, L. M. T.; JAROCHINSKI, C. S.; VIEIRA, S. S. R.; DE AZEVEDO, A. P. S. Determinação da altura e estimativa do número de árvores em um povoamento florestal usando LiDAR. In: **Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. INPE. Florianópolis, Brasil. p. 3665-3667, 2007.
- MEI, C.; DURRIEU, S. Tree crown delineation from digital elevation models and high-resolution imagery. **ISPRS working group VIII/2, Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment**, v. 36, 2004.
- MONGUS, D.; ŽALIK, B. An efficient approach to 3D single tree-crown delineation in lidar data. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 108, p. 219-233, 2015.
- MONICO, J. F. G. Descrição dos métodos de posicionamento GNSS e introdução ao posicionamento por ponto e DGPS: GPS diferencial (DGPS). In: MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS**. 2. ed. Presidente Prudente: Unesp, 2008. Cap. 7. p. 300-309.
- MORS DORF, F.; MEIER, E.; KÖTZ, B.; ITTEN, K. I.; DOBBERTIN, M.; ALLGÖWER, B. LIDAR-based geometric reconstruction of boreal type forest stands at single tree level for forest and wildland fire management. **Remote Sensing of Environment**, v. 92, n. 3, p. 353-362, 2004.
- NELSON, R.; KRABILL, W.; MACLEAN, G. Determining forest canopy characteristics using airborne laser data. **Remote Sensing of Environment**, v. 15, n. 3, p. 201-212, 1984.
- PANG, Y.; LEFSKY, M.; ANDERSEN, H. E.; MILLER, M. E.; SHERRILL, K. Validation of the ICESat vegetation product using crown-area-weighted mean height derived using crown delineation with discrete return lidar data. **Canadian journal of remote sensing**, v. 34, n. sup2, p. S471-S484, 2008.
- PEREIRA, J. P.; SCHIMALSKI, M. B.; HESS, A. F.; ARAKI, E. K.; BRATTI, A. Extração de árvores isoladas e variáveis dendrométricas utilizando dados ALS em áreas naturais. In: **Anais do XI Seminário de Atualização em Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informações Geográficas Aplicados à Engenharia Florestal**. Curitiba, Brasil. 2014.
- PERSSON, A.; HOLMGREN, J.; SÖDERMAN, U. Detecting and measuring individual trees using an airborne laser scanner. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 68, n. 9, p. 925-932, 2002.
- PETRIE, G.; TOTH, C. K. Introduction to Laser Ranging, Profiling, and Scanning. In: SHAN, J.; TOTH, C. K. **Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing**. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2008. Cap. 1. p. 1-27.
- PEUCKER, T. K.; FOWLER, R. J.; LITTLE, J. J.; MARK, D. M. The triangulated irregular network. In: **Amer. Soc. Photogrammetry Proc. Digital Terrain Models Symposium**. 1978. p. 532.
- PEUCKER, T. K.; FOWLER, R. J.; LITTLE, J. J.; MARK, D. M. **Digital Representation of Three-Dimensional Surfaces by Triangulated Irregular Networks (TIN)**. Simon Fraser University Burnaby BC. Canada. Technical Report, 1976.
- PITKÄNEN, J.; MALTAMO, M.; HYYPPÄ, J.; YU, X. Adaptive methods for individual tree detection on airborne laser based canopy height model. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 36, n. 8, p. 187-191, 2004.
- POPESCU, S. C.; WYNNE, R. H. Seeing the trees in the forest. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 70, n. 5, p. 589-604, 2004.
- RAHMAN, M. Z. A.; GORTE, B. G. H. Tree crown delineation from high resolution airborne lidar based on densities of high points. In: **Proceedings ISPRS Workshop Laser scanning 2009**, September 1-2, France, IAPRS, XXXVIII (3/W8), 2009. ISPRS, 2009.

- REITBERGER, J.; SCHNÖRR, C.; KRZYSZEK, P.; STILLA, U. 3D segmentation of full waveform lidar data for single tree detection using normalized cut. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 37, p. 77-83, 2008.
- REITBERGER, J.; SCHNÖRR, C.; KRZYSZEK, P.; STILLA, U. 3D segmentation of single trees exploiting full waveform lidar data. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 64, n. 6, p. 561-574, 2009.
- ROSELL, J. R.; SANZ, R. A review of methods and applications of the geometric characterization of tree crops in agricultural activities. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 81, p. 124-141, 2012.
- SITHOLE, G.; VOSSSELMAN, G. Filtering of airborne laser scanner data based on segmented point clouds. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 36, n. part 3, p. W19, 2005.
- SMITS, I.; PRIEDITIS, G.; DAGIS, S.; DUBROVSKIS, D. Individual tree identification using different lidar and optical imagery data processing methods. **Biosystems Inform Tech**, v. 1, p. 19-24, 2012.
- ST-ONGE, B. A. Estimating individual tree heights of the boreal forest using airborne laser altimetry and digital videography. In: **Workshop of ISPRS WG III/2 & III/5: Mapping surface structure and topography by airborne and space borne lasers**. 1999.
- TITTMANN, P.; SHAFII, S.; HARTSOUGH, B.; HAMANN, B. Tree detection and delineation from lidar point clouds using RANSAC. **Proceedings of SilviLaser**, 2011.
- VAN LAAR, A.; AKÇA, A. **Forest Mensuration**. Dordrecht: Springer, 2007. 13 v.
- VEGA, C.; HAMROUNI, A.; EL MOKHTARI, S.; MOREL, J.; BOCK, J.; RENAUD, J. P.; BOUVIER, M.; DURRIEU, S. PTrees: A point-based approach to forest tree extraction from lidar data. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 33, p. 98-108, 2014.
- VENGADESWARI, R.; RAJALAKSHMI, S. A survey on urban vegetation detection using airborne lidar data images. In: **Information Communication and Embedded Systems (ICICES), 2013 International Conference on**. IEEE, 2013. p. 937-942.
- VOSSSELMAN, G. Slope based filtering of laser altimetry data. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 33, n. B3/2; PART 3, p. 935-942, 2000.
- WEHR, A. lidar Systems and Calibration. In: SHAN, J.; TOTH, C. K. **Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing**. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2008. Cap. 4. p. 129-170.
- WEHR, A.; LOHR, U. Airborne laser scanning - an introduction and overview. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 54, n. 2, p. 68-82, 1999.
- WIEDEMANN, C.; HEIPKE, C.; MAYER, H.; JAMET, O. Empirical evaluation of automatically extracted road axes. **Empirical Evaluation Techniques in Computer Vision**, p. 172-187, 1998.
- ZANDONÁ, D. F.; LINGNAU, C.; NAKAJIMA, N. Y. Utilização da tecnologia LIDAR para obtenção de altura individual e delimitação automática de copas em povoamento de Pinus sp. In: **Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. INPE. Florianopolis, Brasil. p. 3963-3700, 2007.
- ZUCKER, S. W. Region growing: Childhood and adolescence. **Computer graphics and image processing**, v. 5, n. 3, p. 382-399, 1976.

APÊNDICE A – MAPA DE REFERÊNCIA: ÁREA CENTRAL DE PRESIDENTE PRUDENTE

Figura 35 - Mapa de referência - Área central de Pres. Prudente



Fonte: Autor (2017)

APÊNDICE B – MAPA DE REFERÊNCIA: CAMPUS DA UNESP/PP

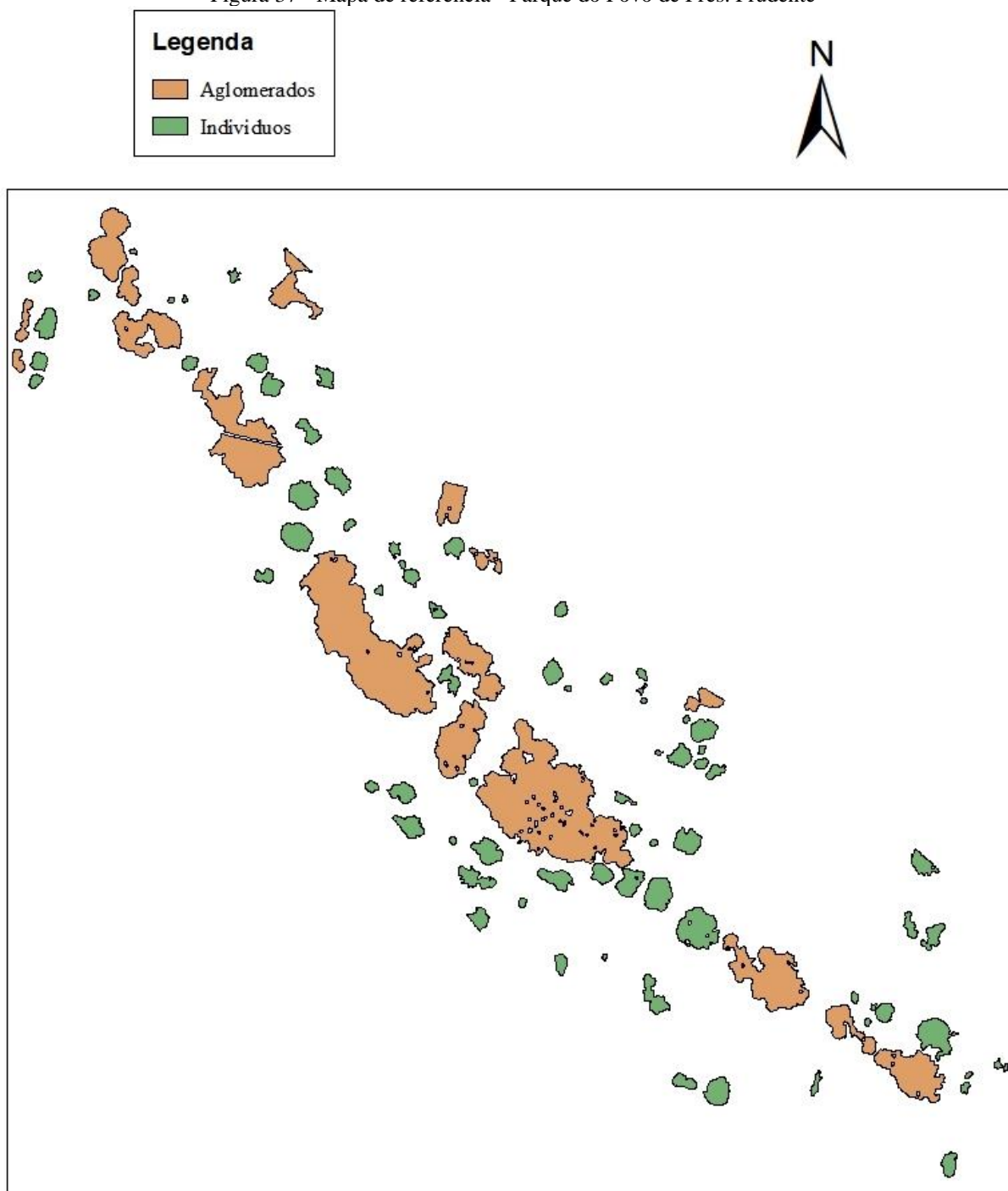
Figura 36 - Mapa de referência - Campus UNESP/PP



Fonte: Autor (2017)

APÊNDICE C – MAPA DE REFERÊNCIA: PARQUE DO POVO DE PRESIDENTE PRUDENTE

Figura 37 - Mapa de referência - Parque do Povo de Pres. Prudente



Fonte: Autor (2017)