

CLASSIFICAÇÃO DE PONTOS LIDAR PARA A GERAÇÃO DO MDT

Classification of LIDAR point for DTM generation

ADMILSON DA PENHA PACHECO¹
JORGE ANTONIO SILVA CENTENO²
MARCIO GEOVANI TAVARES DE ASSUNÇÃO¹
MOSAR FARIA BOTELHO³

¹Universidade Federal de Pernambuco – UFPE/PPGCGTG
Rua Acadêmico Hélio Ramos s/nº
CEP - 50740-530 – Recife, Pernambuco, Brasil

²Universidade Federal do Paraná – UFPR
Curso de Pós-Graduação em C. Geodésicas
Centro Popitécnico – J. das Américas – Caixa Postal 19.001
CEP – 81.531-990 Curitiba, Paraná, Brasil

³Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR
CEP: 81.531-990 - Dois Vizinhos, Paraná, Brasil
pacheco3p@gmail.com, mgta@hotmail.com; centeno@ufpr.br ;
mosar@utfpr.edu.br

RESUMO

Nos últimos anos tem se observado uma representativa evolução da tecnologia LIDAR (*Light Detection and Ranging*) na aquisição automática do MDT (*Modelo Digital do Terreno*) em áreas urbanas e rurais. Os métodos existentes na literatura remetem a regiões para casos específicos no hemisfério norte, onde as condições de vegetação e uso do solo são diferentes das encontradas no Brasil. O presente trabalho tem como objetivo investigar e discutir métodos de classificação de dados LIDAR utilizados para a geração automática do MDT, usando os conceitos de morfologia matemática no processo de filtragem e classificação dos pontos. O processo metodológico compreendeu: definição e caracterização da área de aplicação dos testes de verificação, bem como as condições de aquisição dos dados utilizados; descrição do método denominado Filtro Morfológico; e, por fim, o método para a análise e comportamento da metodologia proposta. A qualidade dos produtos gerados nos experimentos realizados mostrou-se satisfatória, considerando

os aspectos numéricos relacionados com o erro médio e a variância das áreas testadas. Os resultados mostraram que a geração do MDT em áreas urbanas apresentou maior consistência em consequência, principalmente, da presença de áreas livres ao nível do terreno, favorecendo a viabilidade do uso do método de classificação.

Palavras-chave: Modelo Digital do Terreno; Morfologia Matemática; LIDAR.

ABSTRACT

Lately a representative evolution of the LIDAR (Light Detection and Ranging) technology to automatic acquisition DTM (Digital Terrain Model) has been observed for urban and rural areas. Present methods in the literature refer to regions for specific cases in the northern hemisphere, where the conditions of vegetation and land use are different from those found in Brazil. This paper aims at investigating and discussing methods for classifying LIDAR data used for the automatic generation of DTM, using mathematical morphology in the process of filtering and classification of points. The methodological process involved the following steps: definition and characterization of the area of application of the verification tests, the conditions used for data acquisition, description of the method Morphological filter, and finally, the framework for analyzing the results. The quality considering the numerical aspects like average error and sample variance of the generated models for the study areas was satisfactory. The results showed that the generation of digital terrain model in urban areas had greater consistency, mainly due to the presence of open spaces at ground level, this fact feasibility of using the classification method.

Keywords: Digital Terrain Model; Mathematical Morphology; LIDAR.

1. INTRODUÇÃO

O LASER scanner aerotransportado, ALS (*Airborne Laser Scanner*), também conhecido como LIDAR (*Light Detection and Ranging*) vem, há pouco mais de 20 anos, sendo utilizado em uma variedade de estudos e aplicações relativas à representação de superfícies. Nos últimos anos, porém, a tecnologia LIDAR vem se consagrando como alternativa viável à aquisição automática do MDT (Modelo Digital do Terreno).

Ao longo dos últimos dez anos, os resultados obtidos a partir das pesquisas que utilizam dados LIDAR para modelagem do terreno, em especial para geração automática do MDT em mapeamentos de grande escala e alta acurácia, vem evolutivamente constatando a potencialidade de encontrar nessa tecnologia uma resposta conclusiva quanto a sua aplicação, conforme comprovam estudos realizados por: VOSSSELMAN(2000); SITHOLE(2001); SITHOLE e VOSSSELMAN (2003); ROTTENSTEINER et al. (2003); VÖGTLE e STEINLE (2005); CHEN et al. (2007); SCHIMALSKI et al. (2009); XIAO et al. (2010);

OUDE e VOSSSELMAN (2011).

Atualmente uma tendência de pesquisa é usar dados de sensores para realizar a complexa tarefa de extração automática de feições. Segundo DAL POZ et al. (2007), na área de ciências cartográficas, o problema de extração de feições tem sido de fundamental importância, há mais de duas décadas, na automação dos processos de coleta de feições cartográficas, como edifícios, rios, estradas, etc.

Além da busca pela automação dos processos citados anteriormente, é importante investigar se esses métodos vêm suprimir as necessidades e a diversidade das condições de vegetação e uso do solo em diferentes regiões do Brasil.

O presente trabalho tem como objetivo investigar e discutir métodos de classificação de dados LIDAR utilizados para a geração automática do MDT em regiões urbanas e de vegetação, utilizando, para tanto, os conceitos de morfologia matemática no processo de filtragem e classificação dos pontos.

1.1 Fundamentação Teórica

A utilização do LASER aerotransportado como instrumento de Sensoriamento Remoto vem acontecendo a partir da década de 80, quando a altimetria passou a ser realizada através de instrumentos transportados por aeronaves. O princípio de operação do sistema de varredura a LASER baseia-se na determinação da distância entre o sensor e a superfície através de um pulso que se propaga à velocidade da luz. A distância é determinada medindo o tempo decorrido entre a emissão do pulso e o registro da parcela refletida pela superfície (WUTKE e CENTENO, 2007). O sistema LASER aerotransportado gera coordenadas tridimensionais de pontos na superfície terrestre. Baseadas na medição do tempo de emissão e retorno de um pulso de LASER sobre uma superfície, as posições determinadas pelo perfilamento LASER são capturadas. Objetivando corrigir os movimentos da aeronave são geradas e gravadas pelo sistema de medição inercial as atitudes referentes a cada distância medida. A atitude representa a orientação do centro de medição do sensor no espaço e pode ser descrita pelos ângulos de Euler, os quais definem as rotações a que está sujeito o sensor segundo os eixos cartesianos (LOHR e EIBERT, 1995).

O tamanho dos objetos em relação à projeção do feixe e os elementos que compõem a superfície varrida determinam a intensidade do pulso que retorna ao sensor e, assim, um pulso pode não atingir um único objeto podendo ser refletido por diferentes pontos localizados a diferentes distâncias do sensor. Nesses casos, o ponto mais próximo ocasionará o retorno de parte do feixe LASER (primeiro retorno) mais rapidamente enquanto o ponto mais distante ocasionará um último retorno de parte do feixe LASER. Este fato é de significativa relevância quando se considera a diferença de penetração que pode existir a partir de um único pulso (BEHAN, 2000), o que permite a distinção de elevações. O produto final deste sistema LASER é uma nuvem de pontos com coordenadas tridimensionais e valores de intensidade do objeto refletido. Assim, o conceito de Modelo Digital Superfície

(MDS) se distinguirá do MDT por ser uma descrição que envolve a cota superior dos objetos acima da superfície, além do terreno. Informações complementares podem ser encontradas em WEIDNER E FÖRSTNER (1995), DELL'ACQUA ET AL. (2001) e, BOTELHO e CENTENO (2007).

A obtenção de um MDT a partir de dados LIDAR requer a identificação (classificação) dos pontos que correspondem a objetos acima do terreno para excluir virtualmente tais pontos do MDS inicial. LOHMANN et al. (2000) atribuem o termo “filtragem” ao processo de identificação de pontos no terreno e pontos elevados acima do mesmo, enquanto o termo “classificação” é adotado por BRIESE e PFEIFER (2001). Em virtude da eliminação dos pontos acima do terreno, ocorre uma significativa redução dos dados obtidos, cujas lacunas são preenchidas pela interpolação (SHIMALESKY, 2007).

Segundo SITHOLE e VOSSSELMAN (2005), pode-se ainda gerar o modelo digital do terreno numa área coberta por vegetação, identificando do conjunto de dados, os pontos mais baixos que são os pulsos que atingiram o terreno, e filtrando o restante dos pulsos. Diferentes técnicas de filtragem são descritas pelos autores.

De acordo com SITHOLE e VOSSSELMAN (2005), cada método de filtragem assume diferentes hipóteses a respeito da estrutura do terreno no local, o que condiciona o princípio metodológico adotado pelo filtro afetando seu desempenho.

A obtenção de MDT a partir da filtragem de Modelos Digitais de Superfície tem, nos últimos anos, impulsionando os principais centros de pesquisa nessa área do conhecimento a desenvolver métodos cada vez mais sofisticados e eficazes. Atualmente os conceitos que envolvem essa questão ainda partem dos que foram citados por SITHOLE e VOSSSELMAN (2003) e KOBLER et al. (2007), o que permitem classificar o método de classificação/filtragem em:

- **Declividade:** Essencialmente a idéia desse filtro é a de que, para uma das diferenças de altura entre dois pontos, a probabilidade de o ponto mais alto não pertencer ao terreno aumenta com a diminuição da distância linear entre eles (VOSSSELMAN, 2000).

- **Superfície:** VOSSSELMAN (2000) considera que visto que uma pequena porcentagem de pontos de um levantamento LIDAR atinge o terreno, estes podem ser usados para classificar os restantes. Os mínimos locais da nuvem de pontos são considerados como pertencentes ao terreno e dão origem a uma superfície inicial. Um ponto qualquer pertenceria ao terreno se a diferença de altura entre este ponto e a superfície inicial for menor que um limiar pré-estabelecido. O método é interativo e a cada passo novos pontos são adicionados, melhorando a superfície inicial e aproximando-a do MDT.

- **Segmentação:** Neste caso, o conjunto de dados é inicialmente segmentado e depois classificado, considerando que os pontos de um segmento (*cluster*) não pertencem ao terreno se a altura do segmento estiver acima dos segmentos na vizinhança. THUY e TOKUNAGA (2002) utilizaram a transformada Wavelet para realizar a segmentação de dados LIDAR a fim de verificar se a imagem

segmentada poderia ser utilizada para detecção de edificações e outros objetos não pertencentes ao terreno.

- **Bloco Mínimo:** O princípio fundamental desse método é mais comumente conhecido nas literaturas internacionais como *block-minimum*. Dentro de uma região da nuvem de pontos se identifica o menor valor, supostamente do terreno. Em relação a sua altura se definem dois planos horizontais de tolerância, entre os quais se espera que residam os pontos pertencentes ao terreno.

KERSTING et al. (2005) avaliaram um método de redução de pontos oriundos da aquisição de modelos digitais de superfície por LIDAR, baseado na análise de superfícies poligonais definidas por rede irregular de triangulação. Verificou-se que este processo computacional gera modelos mais compactos, com tamanhos mais reduzidos o que os originais e pouca perda de informação, garantindo uma boa relação em termos de processamento e armazenamento dos dados.

CENTENO e MITISHITA (2007) utilizaram a tecnologia LIDAR em ambientes urbanos e observaram que o sistema oferece grandes vantagens para obtenção de informações sobre construções, principalmente, pelo fato dos dados de natureza geométrica serem complementares aos dados espectrais, tradicionalmente empregados no sensoriamento remoto.

ZANDONÁ. et al. (2008), aplicando uma metodologia para identificação de árvores individuais a partir de dados LIDAR, obtiveram um acerto médio de 82,8 %. Estudos mais recentes sobre análise de parâmetros florestais a partir de dados LIDAR são encontrados em OONO et al. (2008), MACEDO (2009), CUESTA et al. (2009), HIRATA et al. (2009) e IOKI et al. (2010).

De acordo com SCHIMALSKI et al. (2009), os algoritmos de filtragem convergem para resultados satisfatórios quando aplicados a áreas com relevo mais suave. Entretanto, para áreas inclinadas e cobertas por vegetação apresentam problemas durante o processo de filtragem e classificação, tornando as áreas rurais e, especificamente as que contem florestas, áreas consideradas críticas para a perfeita separação das feições pertencentes à superfície das do terreno.

Os dados do satélite altimétrico ICESat são amplamente aplicados na detecção de alterações de equilíbrio das massas polares, estimativa da estrutura da floresta e geração de modelo digital do terreno das áreas remotas (DONG et al. 2009). No trabalho de DONG et al. (2009) dados ICESat são comparados com dados LASER aerotransportado. Os Resultados mostraram que as diferenças altimétricas médias são inferiores a 25 centímetros sobre solos expostos e as áreas urbanas. Sobre as florestas as diferenças são bem menores. XIAO et al. (2010) combinaram dados LIDAR e imagens oblíquas em estudos de detecção automática de construções (edifícios). Verificaram que a abordagem pode ser melhorada pelo ajuste do método de segmentação e pela adição de parâmetros no plano de varredura, a fim de se alcançar uma melhor performance em diferentes tipos de prédios. O trabalho OUDE e VOSSSELMAN (2011) apresenta uma abordagem teórica e empírica para identificar as partes fortes e as deficiências na construção de modelos 3D

reconstruídos a partir de dados de varredura LASER aerotransportado sem o uso de medições de referência.

Os desafios a serem vencidos na geração do MDT incluem a classificação de informações em regiões que apresentam uma menor taxa de incidência de pontos LASER sobre o terreno, tais como áreas de vegetação densa e espaços urbanos com aglomeração de edificações e demais estruturas implantadas pelo homem. Isto ocorre geralmente em áreas urbanas e bosques densos. Cabe a investigação devido a incerteza quanto à origem do ponto refletido (terreno ou vegetação). Em regiões urbanas, as diferenças decorrem das diferentes taxas e modelos de ocupação. Em países em desenvolvimento, o controle cadastral é menor e conseqüentemente a ocupação é mais desordenada, apresentando maior taxa de cobertura do solo.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O processo metodológico para obtenção automática de um MDT usando os conceitos de morfologia matemática no processo de filtragem e classificação dos pontos LIDAR envolveu: definição e caracterização da área de aplicação dos testes de verificação, bem como as condições de aquisição dos dados utilizados; descrição do método, inicialmente denominado Filtro Morfológico; e, por fim, a estrutura para análise e comportamento da metodologia proposta.

2.1 Pré-Processamento dos Dados LIDAR

A estrutura de dados utilizada neste trabalho é a de grade regular, com o intuito de permitir o uso dos métodos de processamento digital de imagens para a geração do MDT. A grade foi gerada seguindo os princípios do algoritmo proposto por ACK e WIMMER (2002). Definindo o tamanho e a solução espacial da grade a ser usada, foi calculada a coordenada de grade (linha, coluna) para cada ponto (E, N, H) do conjunto de dados brutos LIDAR. Assim, cada ponto (E, N) é projetado na grade regular, preenchendo-a com a altimetria (H), conforme equação (1) a seguir:

$$\begin{aligned} lin &= (N_{max}-N)/Resolução \\ col &= (E-E_{min})/Resolução \end{aligned} \quad (1)$$

onde:

lin = Linha da grade;
col = Coluna da grade;
N_{max} = Coordenada do extremo Norte;
E_{min} = Coordenada Leste mínima;
Resolução = resolução espacial da grade.

Nos casos em que as células são maiores que o espaçamento entre pontos da varredura LASER, é esperado que pelo menos um ponto seja registrado em cada célula, teoricamente. Como isso não ocorra, células sem valores serão preenchidas com o valor mínimo de sua vizinhança mais próxima.

2.2 O Método: Filtragem Morfológica

O filtro morfológico consiste essencialmente na classificação de pontos LIDAR como pertencentes ou não-pertencentes à superfície do terreno pela aplicação de operações de Dilatação e Erosão da grade. A Erosão Morfológica é basicamente o “encolhimento” de uma imagem enquanto a Dilatação Morfológica, também apontada na literatura como Dilatação, é uma transformação morfológica que implica no “engordamento” de imagens.

A dilatação em níveis de cinza de f por b é denotada $f \oplus b$ e definida (GONZALES e WOODS, 2000) como:

$$(f \oplus b)(s, t) = \max\{f(s - x, t - y) + b(x, y) \mid (s - x), (t - y) \in Df; (x, y) \in Db\} \quad (2)$$

A erosão em níveis de cinza de f por b é denotada $f \ominus b$ e definida como:

$$(f \ominus b)(s, t) = \min\{f(s + x, t + y) + b(x, y) \mid (s + x), (t + y) \in Df; (x, y) \in Db\} \quad (3)$$

Em ambos os casos f representa a imagem sendo operada e b é um segundo conjunto, chamado de elemento estruturante. D_f e D_b são os domínios de f e b , respectivamente.

O elemento estruturante é uma pequena matriz (ou imagem) que é utilizada para checar se em uma determinada região da imagem é satisfeita uma determinada propriedade geométrica. O elemento estruturante mais comum é uma matriz quadrada com tamanho ímpar em termos de linhas e colunas, embora outras formas sejam também usadas.

Quando aplicada a imagens de nível de cinza, a dilatação equivale ao deslocamento do elemento estruturante ao longo da imagem e atribuir ao pixel central desta janela móvel um valor igual ao máximo de toda a vizinhança, caracterizada pelo elemento estruturante. De maneira análoga, a operação de erosão consiste em atribuir à célula o valor mínimo encontrado nesta vizinhança. Vale a pena ressaltar que estas operações não são complementares.

O método utilizado para processar a grade e suprimir as células com elevações acima do terreno consiste na aplicação de uma erosão seguida pela dilatação do produto. Ao efetuar a erosão, os valores extremamente altos são eliminados (poda) e a seguinte dilatação aproxima o resultado da grade original sem a presença destes extremos. A distância entre os elementos removidos, picos, e o modelo resultante é analisada a seguir. Sendo f a imagem original, o resultado desta diferença é formalmente expresso pela equação 4:

$$g = f - (f \ominus b) \oplus b \quad (4)$$

Com a finalidade de preservar a estrutura do terreno e preservar os picos próximos ao modelo, um limiar de tolerância (tol) é estabelecido pelo usuário para a

distância:

$$H = tol - g$$

Se $H > 0$, o ponto é classificado como parte de um objeto (elevação)

Se $H \leq 0$, o ponto é considerado pertencente ao terreno e por isso não é excluído.

O processo é iterativo e é repetido até que não existam mais remoções, quando se assume que a superfície do terreno foi aproximada. Especial cuidado deve ser tomado na escolha do limiar de tolerância, pois valores extremamente grandes ou pequenos podem influenciar a forma do terreno resultante.

2.3. Avaliação Metodológica

Um programa em C++ foi escrito aplicando o método descrito. O método foi aplicado nas quatro áreas de estudo. O elemento estruturante escolhido é quadrado. Em uma fase inicial, foram realizados experimentos variando, de forma empírica, o tamanho do mesmo, iniciando o processo com tamanho três e aumentando a um tamanho com valor de 15 pixels. O tamanho do elemento escolhido foi de sete pixels por apresentar um melhor comportamento para o efeito da erosão e dilatação, sendo que o elemento estruturante foi composto apenas com valores de "1", onde busca-se eliminar os picos excessivos de altitude, conforme proposto na metodologia.

Como áreas de aplicação do estudo proposto foram utilizadas 4 (quatro) regiões distintas do Campus III (Centro Politécnico) da Universidade Federal do Paraná - UFPR - Curitiba - PR, escolhidas oportunamente por apresentarem comportamentos variados no que diz respeito a relevos notoriamente acidentados, heterogeneidade de feições e edificações, densidade da vegetação em área urbana e variabilidade altimétrica, conforme pode ser observado a seguir:

Região 1: Compreende a área do Laboratório de Geodésia Espacial (LAGE) da UFPR, ilustrada na Figura 1 a seguir, e foi escolhida por apresentar baixa variedade de feições e relevo pouco acidentado a serem identificados facilmente pelo LASER, no momento da aquisição dos dados.

Figura 1 – Região do LAGE.



Região 2: Corresponde às mediações das quadras esportivas do campus, ilustrada na Figura 2 onde, diferentemente da primeira, o relevo oferece acentuados declives e aclives, além de apresentar variadas feições, cujo comportamento pode ser melhor observado na aplicação dos métodos propostos.

Figura 2 - Região das Quadras Esportivas do Centro Politécnico.



Região 3: A terceira área de estudos diz respeito a um bosque nas proximidades dos blocos do curso de engenharia florestal no Centro Politécnico, ilustrada na Figura 3 a seguir, região esta constituída por densa vegetação arbórea de grande porte e por declives acentuados.

Figura 3 - Bosque do Centro Politécnico.



Região 4: A quarta e última área de estudos abrange as quadras residenciais do bairro Jardim das Américas, (Figura 4), mais especificamente ao lado do Centro Politécnico da UFPR e foi escolhida por apresentar feições naturais heterogêneas e quantidade significativa de edificações de porte variável.

Figura 4 - Mediações do Centro Politécnico (Jardim das Américas).



O levantamento dos dados utilizados (varredura a LASER) foi executado pelo Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC - UFPR), com o sistema OPTTECH ALTM 2050, realizado a uma altura de vôo de 1000 metros, densidade de pontos de 1 ponto a cada 66 cm em média, tanto em x como em y e disponibilizadas 6 faixas com largura de 350 metros cada.

Para analisar a eficiência dessa aplicação e mensurar a qualidade visual e numérica dos produtos obtidos, foi gerado para cada área um MDT de verificação utilizando o software *TerraScan 2.0*, fornecido pelo LACTEC. Internacionalmente, o método proposto pela firma finlandesa *Terrasolid*, baseado na declividade tem apresentado consistência em sua performance. A descrição do algoritmo de extração de MDT adotado para o *TerraScan* foi publicada por AXELSSON (2000).

Ao subtrair um produto pelo outro (MDT/*TerraScan* - MDT/Gerado), uma nova grade é gerada. Esta grade foi usada para a análise do desempenho geral do método em todas as regiões experimentais. Para isto, inicialmente foram calculados os valores médios, a variância e desvio padrão, bem como as maiores e menores diferenças entre as grades regulares gerada pelo software *TerraScan* e pelo Filtro Morfológico implementado.

A “média” esperada é nula. No caso ideal, o modelo gerado pelo Filtro Morfológico deveria ser igual ao de verificação gerado pelo software *TerraScan*, tendendo o valor da média igual a zero. A variância ou o desvio padrão mostram a dispersão das diferenças.

Uma importante comparação consiste em verificar se as diferenças presentes nas diferentes regiões são equivalentes, mesmo considerando as peculiaridades da topografia. Para isto, um teste de hipótese deve ser aplicado.

A hipótese nula (H_0) a ser verificada é a de que as duas amostras (grades de diferença) tenham sido obtidas de populações com médias iguais, ou seja: $\mu_1 - \mu_2 = 0$.

Assumindo que os dois conjuntos de dados são duas populações normais independentes $N(\mu_1, \sigma_1^2)$ e $N(\mu_2, \sigma_2^2)$ e que se dispõe de amostras de tamanho n_1 e n_2 de cada população, cujas médias amostrais são m_1 e m_2 e as respectivas variâncias amostrais S_1^2 e S_2^2 , a estatística de teste t para verificar a hipótese nula é:

$$z = (m_1 - m_2) / (S_1^2/n_1 + S_2^2/n_2)^{1/2} \quad (5)$$

A hipótese a ser verificada H_0 é que não há diferença significativa entre as médias de duas grades de diferença, considerando um nível de significância de $\alpha=0,05$: $H_0 : \mu_1 = \mu_2$; $H_1 : \mu_1$ diferente de μ_2

Para efetuar este teste, deve ser inicialmente verificado se as variâncias populacionais são diferentes, através do teste F. Para isto, a seguinte hipótese é verificada: $H_0 : \sigma_1^2 = \sigma_2^2$; $H_1 : \sigma_1^2$ diferente de σ_2^2

A variável indicada para avaliação do teste F é:

$$F_{n1-1, n2-1} = s_1^2 / s_2^2 \quad (6)$$

Se as variâncias populacionais (desconhecidas) são consideradas diferentes, segundo o teste F, a variável z terá ν graus de liberdade, segundo a equação 6 de acordo com Pestana e Velosa (2006).

$$\nu = [(A_1 + A_2)^2 / (A_1^2 / (n_1 + 1) + A_2^2 / (n_2 + 1))] - 2 \quad (7)$$

com $A_i = S_i^2 / n_i$ e $\alpha = 0,05$

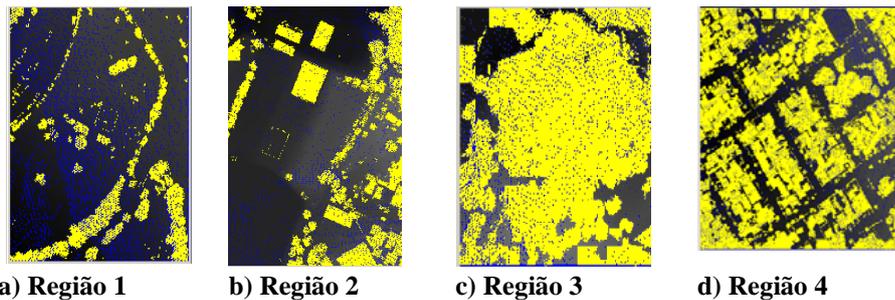
3.RESULTADOS

A partir dos dados do LIDAR, são apresentados nesta secção os resultados obtidos com a aplicação da metodologia proposta, removendo os pontos que representam os objetos acima do terreno.

Os melhores resultados visuais foram alcançados a partir da definição de uma janela de varredura com dimensão de 24x24 metros (região de análise) e um limite de tolerância altimétrica de 50 cm.

Na Figura 5, que ilustra a projeção no plano do resultado da classificação para as quatro respectivas regiões, destacam-se áreas amareladas correspondentes aos pontos LIDAR que incidiam sobre os objetos acima do terreno (solo) propriamente ditos e foram eliminados no processo. As demais regiões compreendem ao terreno propriamente dito.

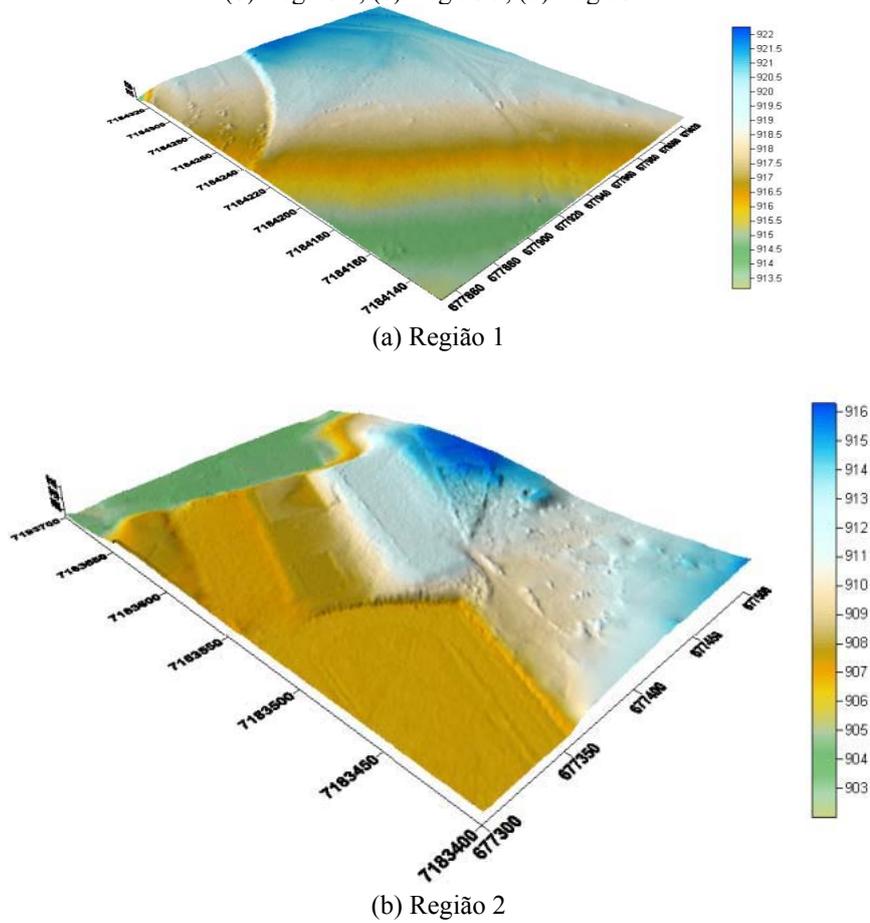
Figura 5 – Modelo Digital do Terreno gerado com a filtragem morfológica apresentando os pontos extraídos pelo filtro das áreas de teste sendo (a) Região 1, (b) Região 2, (c) Região 3, (d) Região 4.

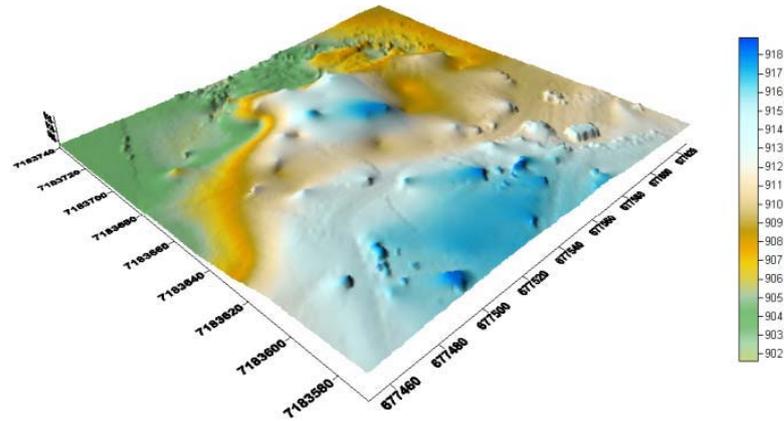


A Figura 6 a seguir, ilustra tridimensionalmente o MDT das quatro regiões de estudo caracterizadas neste trabalho. Observando as Figuras 5 e 6, nota-se que os elementos naturais e artificiais acima da superfície do solo foram extraídas com

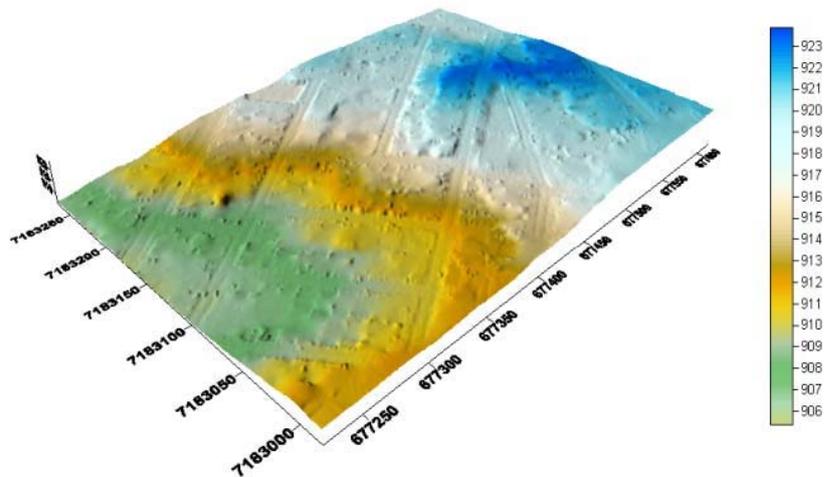
eficiência, tanto para regiões com aglomerações de árvores (região 3) quanto para regiões urbanizadas (região 4). A filtragem aplicando essa metodologia mostra-se eficiente tanto para regiões planas (região 1) quanto para onduladas (região 2).

Figura 6 - Modelo Digital do Terreno em 3D das áreas de teste sendo (a) Região 1, (b) Região 2, (c) Região 3, (d) Região 4





(c) Região 3



(d) Região 4

3.1 Análise Quantitativa: Comparação entre MDT's

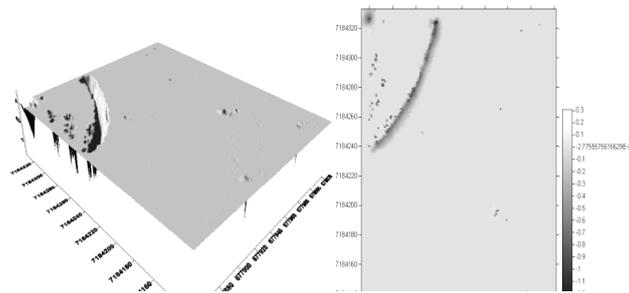
Para avaliação e análise da qualidade e mensuração quantitativa dos produtos gerados com a aplicação do filtro morfológico, foram seguidos critérios de observação visual e a comparação entre os MDT's gerados pela metodologia proposta e os respectivos MDT's de verificação (oriundos do software *TerraScan 2.0*) considerados como produtos de qualidade constatada em outros trabalhos. A Tabela 1 apresenta um resumo das estatísticas obtidas em cada caso.

Tabela 1 – Estatística quanto à diferença entre grades (MDT/TERRASCAN – MDT/MORFOLÓGICO).

Áreas de Estudo	Região	Região	Região	Região
Pontos Verificados	26419	39796	9307	46880
(<) Diferença	- 0,31 m	- 0,45 m	- 0,31 m	- 0,39 m
(>) Diferença	1,36 m	3,15 m	0,12 m	0,03 m
Média	0,01 m	0,06 m	0,21 m	0,06 m
Desvio Padrão	0,07 m	0,14 m	0,69 m	0,15 m

a) Região 1: Os experimentos realizados nesta região apontam, conforme a Tabela 1, para um desvio padrão de 7cm e média ponderada de 1cm que retratam uma regularidade no comportamento classificatório do filtro. Esses indicadores são considerados satisfatórios, uma vez que se encontram abaixo do limite de tolerância do equipamento para esse projeto que é de 15cm para altimetria. Os menores valores da diferença se concentram numa região mais acidentada, localizada no canto superior esquerdo da Figura 7b.

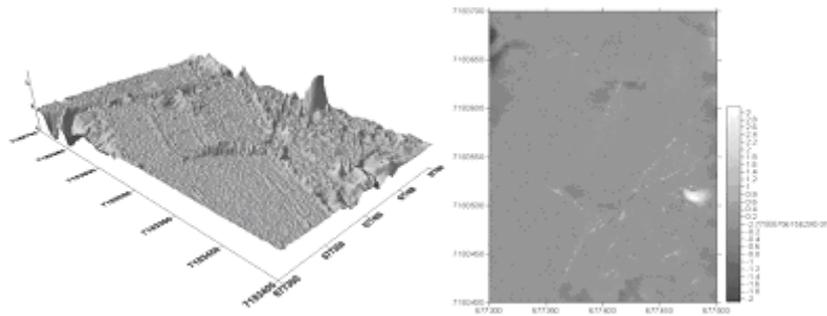
Figura 7- Região 1: Subtração do MDT TERRASCAN 2.0 pelo MDT/Gerado.



a) Representação dos resíduos 3D **b)** Representação dos resíduos 2D

b) Região 2: Considerando a Tabela 1 e a Figura 8, nota-se que para a região das quadras esportivas do Centro Politécnico, caracterizada por relevo mais acidentado, a aplicação do filtro morfológico proporcionou diferenças residuais maiores que as encontradas na primeira região de estudo, mas ainda assim podem ser consideradas satisfatórias, uma vez que a média e desvio padrão estimados em 6cm e 14cm respectivamente, ficaram dentro do limite estipulado pelo fabricante do equipamento. Esta região apresenta maiores declividades e árvores, que originam os valores mínimos e máximos de ordem de grandeza superior. Estes valores são compreensíveis, quando se considera as características físicas do local, conforme ilustração da Figura 8.

Figura 8 - Região 2: Subtração do MDT TERRASCAN 2.0 pelo MDT/Gerado pelo Método Morfológico (Diferença tridimensional e bidimensional).

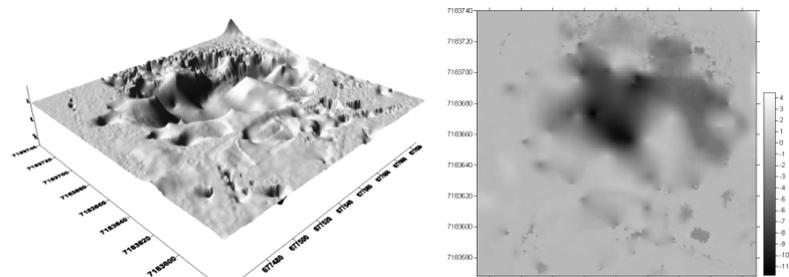


a) Representação dos resíduos 3D b) Representação dos resíduos 2D

c) **Região 3:** Considerando a Tabela 1, as diferenças residuais encontradas para essa área de estudos correspondem aos mais altos índices encontrados na pesquisa.

A menor diferença de $-0,31\text{m}$ e os $11,77\text{m}$ para o maior afastamento entre as grades refletem a irregularidade do produto gerado, decorrentes da definição do tamanho da vizinhança e do limiar de altitude. A média de 21cm e o desvio padrão de 69cm caracterizam o desempenho inferior neste experimento. Observando-se a Figura 9 notam-se os resíduos resultantes da subtração entre as superfícies do MDT gerado e a de verificação.

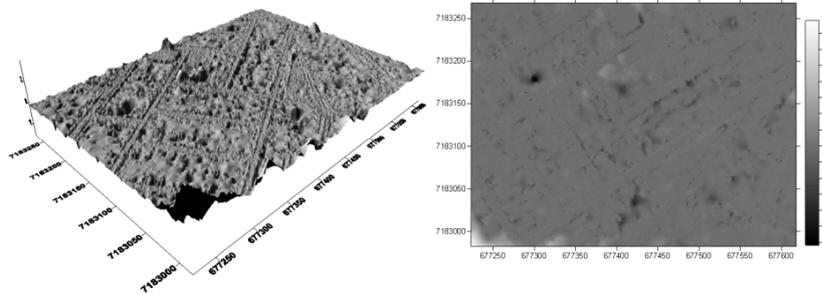
Figura 9 - Região 3: Subtração do MDT TERRASCAN 2.0 pelo MDT/Gerado pelo Método Morfológico (Diferença tridimensional e bidimensional).



a) Representação dos resíduos 3D b) Representação dos resíduos 2D

d) Região 4: O desempenho do método morfológico nessa região, de acordo com a Tabela 1, assim como ocorreu na região de estudos 2 (quadras esportivas), apresentou resultados numéricos dentro dos 15cm almejados. A Figura 10 ilustra as discrepâncias entre o produto gerado e a superfície de referência correspondente a 0,39m e 3,09m para a menor e maior diferenças, respectivamente, média de 6cm e desvio padrão estimado em 15cm.

Figura 10 - Região 4: Subtração do MDT TERRASCAN 2.0 pelo MDT/Gerado pelo Método Morfológico (Diferença tridimensional e bidimensional).



a) Representação dos resíduos 3D **b)** Representação dos resíduos 2D

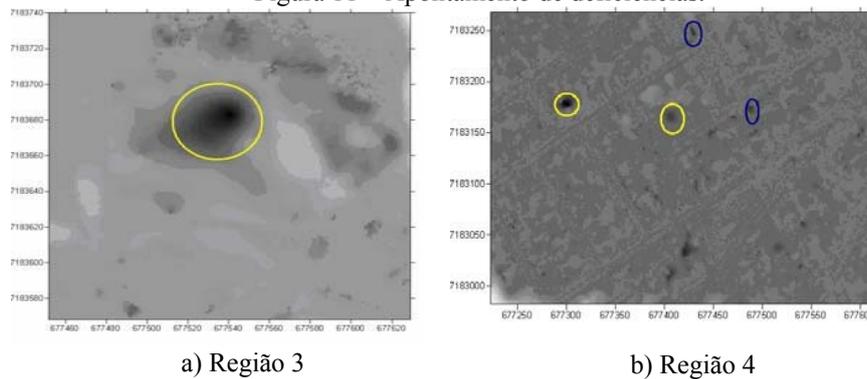
A remoção da vegetação e objetos artificiais da nuvem de pontos LIDAR com a morfologia matemática proporcionou resultados representativos, uma vez que numericamente os índices ficaram, em sua maioria, abaixo ou permeando os 20 cm que é a tolerância garantida pelo fabricante para o equipamento LASER utilizado.

Excetuando-se a região 3, onde, em função da composição vegetativa densa, reconhecidamente problemática, as diferenças residuais oriundas da subtração entre o MDT gerado e o MDT fornecido pelo algoritmo de extração automático implementado no programa *TerraScan* apresentaram um desvio padrão abaixo do limite tolerável pelo equipamento utilizado, para as condições do vôo deste projeto, que é de 15cm para altimetria. A dificuldade do pulso LASER em penetrar a vegetação mais densa resulta em poucos pontos que atingem o solo. Logo, a erosão e posterior dilatação aplicado pelo algoritmo, não conseguem aproximar o terreno, gerando ainda uma superfície muito irregular.

A quarta região é uma região urbana típica, logo, a existência de grandes áreas de rua ou pátios e as construções serem de pequeno porte, a densidade de pontos que atinge o terreno é alta. Por isto, o método morfológico tem sucesso similar ao encontrado nas duas primeiras áreas de teste.

A explicação para essas ocorrências varia caso a caso e é peculiar a cada região e classificação pertinente. Assim, optou-se pela verificação in loco das situações ilustradas na Figura 11.

Figura 11 – Apontamento de deficiências.



Para as manifestações de áreas escuras na região 3 (bosque), circuladas em amarelo na Figura 11-a, foi verificada a presença de árvores, cuja folhagem não permitiu que os feixes LASER do sistema de varredura chegassem até o solo, causando, desse modo, equívocos de classificação. Fato esse observado principalmente em regiões que apresentam baixa taxa de incidência de pontos no solo. Evento similar ocorre também na região 4, contudo, os elementos correspondem ao aglomerado de edificações presentes no local, circulados em azul, as árvores arbustivas de uma praça, circulada em amarelo, em destaque na Figura 11-b. Esses casos representam as principais incoerências que caracterizam os problemas encontrados entre os modelos adquiridos e a realidade do terreno.

3.2 Uniformidade dos Resultados

No teste de similaridade entre variâncias, como a quantidade de pontos é muito grande, o valor de F é de 1,57 ao nível de significância de 5%. A Tabela 2 mostra os valores calculados para a comparação de cada par de grades. Como o valor da variável F para todos os modelos considerados é maior do que o valor Tabelado rejeita-se a hipótese de que as variâncias populacionais, desconhecidas, sejam iguais. Isto pode ser atribuído à menor quantidade de pontos no terreno. Os testes evidenciam que não existem similaridades entre as áreas e que a quantidade de dados amostrais foi suficiente para validar o método proposto. Destacam-se os altos valores associados à região 3, a que contem um bosque. A justificativa é o baixo desempenho apresentado pelo filtro morfológico dentro de regiões com densa cobertura vegetal, o que também é apontado pelo valor alto da média das diferenças mostrado na Tabela 1.

Tabela 2 – Valores da estatística F para os pares de grades diferença.

	<i>Região 2</i>	<i>Região 3</i>	<i>Região 4</i>
Região 1	4,00	97,16	4,59
Região 2	-	24,29	1,14
Região 3		-	21,16

A seguir calculou-se o grau de liberdade para a variável do teste t de Student. Como a quantidade de pontos é muito grande, valores extremamente grandes (maiores que 9000) são obtidos, logo se assume que a variável do teste t de Student terá infinitos graus de liberdade e seu valor de referência será de 2,58. Na Tabela 3 são mostrados os valores da variável do teste t de Student para cada par de grades de diferença. Como em todos os casos os valores são superiores ao valor Tabelado, se rejeita a hipótese nula para todas as combinações de grades. Isto significa que há diferença significativa entre as grades e que o produto depende muito do relevo e da cobertura do solo.

Tabela 3 – Valores da estatística t de Student para os pares de grades diferença.

	<i>Região 2</i>	<i>Região 3</i>	<i>Região 4</i>
Região 1	60,72	27,91	61,29
Região 2		20,87	91,26
Região 3			283,89

4. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A qualidade dos produtos gerados para cada uma das quatro áreas de estudo propostas foi satisfatória, considerando os aspectos numéricos como o erro médio e sua variância. Os valores obtidos nos resíduos ficaram próximos daqueles especificados para o sensor. A situação mais inadequada foi encontrada em áreas de bosque e os melhores resultados em áreas com poucos objetos acima do terreno.

Analisando localmente cada caso, verificou-se que a ocorrência das maiores diferenças é mais comum em regiões de bosque, o que decorre da alta densidade de folhas e pequena taxa de penetração do LASER. Isto é um problema em países tropicais e semi-tropicais, onde a vegetação é abundante. Ressalta-se que é comum encontrar bosques com pequena penetração de luz solar, em função das várias camadas de vegetação. Nesses locais a penetração do pulso LASER também comprovou ser deficiente.

Os resultados foram mais eficientes em áreas urbanas devido à maior concentração de pontos tridimensionais incidentes sobre o terreno. Ruas e pátios são exemplos. Acrescenta-se, entretanto, que erros foram detectados em regiões onde os prédios formam grandes aglomerados e em parques com vegetação densa. Outro problema decorre do ângulo de varredura e da altura de vôo, que podem originar áreas de sombra em ruas, prejudicando a identificação do mesmo.

Observou-se a ineficiência do algoritmo em regiões com acidentes

topográficos acentuados, uma vez que o modelo não considera a declividade do terreno. Recomenda-se a fusão entre métodos utilizando parâmetros de declividade e distância para auxiliar a detecção de pontos LIDAR contidos em áreas que tenham acidentes topográficos íngremes. Ainda sugere-se a utilização de parâmetros espectrais para auxiliar na eliminação de pequenas edificações e arbustos.

Constatou-se que os desafios a serem vencidos na geração automática do MDT a partir de dados LIDAR incluem a classificação de informações em regiões que apresentam uma menor taxa de incidência de pontos LASER sobre o terreno. Estes problemas são dependentes das características peculiares de cada região.

O Desenvolvimento de metodologias para processamento de dados LASER vem permitindo um grande aumento de aplicações práticas e operacionais em vários segmentos das engenharias, geociências e meio ambiente. A evolução das tecnologias utilizadas nos sistemas LIDAR é outro ponto importante, pois se observa um grande avanço nos últimos anos e há fortes indícios da manutenção desta tendência para os próximos anos (XIANG et al. 2010). Em 2009 foi desenvolvido por uma Instituição Francesa um sistema ALS para operação em ultraleve (CUESTA et al, 2009). Além do sensor LASER, este sistema apresenta duas câmeras que operam nas faixas espectrais do ultravioleta, visível e infravermelho próximo. Segundo CUESTA et al. (2009) esta experiência, mesmo na forma de protótipo, pode ser considerada uma alternativa futura muito interessante para viabilizar mapeamentos em áreas florestais, possibilitando a redução de custos na aquisição de dados LIDAR, que normalmente estão relacionados com dispêndios financeiros de voo.

AGRADECIMENTOS

Os autores deste artigo agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e aos Departamentos de Geomática da Universidade Federal do Paraná e de Engenharia Cartográfica da Universidade Federal de Pernambuco pelo apoio concedido para realização deste estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AXELSSON, P. DEM generation from LASER scanner data using TIN models. *International Archives of the Photogrammetry and Remote Sensing*, Amsterdam, The Netherlands, 2000, v. 33 (B4), pp. 110-117.
- BEHAN, A. On the Matching Accuracy of Rastering Scanning LASER Altimeter Data. *The International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 33 (B3), Amsterdam, 2000. Disponível em <http://www.dit.ie/media/documents/built/spatialplanning/MatchingAccuracy.pdf>.
- BOTELHO, M. F.; CENTENO, J. A. S. *Reconstrução tridimensional de edificações utilizando dados LASER scanner aerotransportado*. Boletim de

- Ciências Geodésicas, v. 13, p. 107-126, 2007.
- BRIESE, C.; PFEIFER, N. *Airborne LASER Scanning and Derivation of Digital Terrain Models*. In Grün/Kahmen (Eds.): *Optical 3-D Measurement Techniques*. Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung – I.P.F. Vienna, 2001.
- CENTENO, J. A. S.; MITISHITA, E. A. Laser scanner aerotransportado no estudo de áreas urbanas: A experiência da UFPR. In: XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 04., 2007, Florianópolis, São Jose dos Campos: INPE, 2007, v. 1, p. 3645-3652.
- CHEN, Q.; GONG, P.; BALDOCCHI, D.; XIN, G. *Filtering Airborne LASER Scanning Data with Morphological Methods*. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, v. 73 (2), pp. 175-185, 2007.
- CUESTA, J.; CHAZETTE, P.; ALLOUIS, T.; SANAK, J.; GENAU, P.; FLAMANT, P. H.; DURRIEU, S.; FLAMANT, C. *New airborne LIDAR observes forest canopies*. SPIE Newsroom, 2009. Disponível em <http://spie.org/documents/Newsroom/imported/1732/1732_6076_0_2009-09-21>.
- DAL POZ, A. P.; ZANIN, R. B.; VALE, G. M. *Extração automática de feições rodoviárias em imagens digitais*. *Revista Controle e Automação*. v. 18 (1), p. 44-54, 2007.
- DELL'ACQUA, F.; GAMBA, P.; MAINARDI, A. Digital Terrain Models in dense urban areas. *The International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Annapolis, 2001, v. 34 (3/W4), pp. 195-202.
- DONG, H.; LINDENBERGH, R.; PFEIFER, N.; VOSELMAN, G. ICESat full - waveform altimetry compared to airborne LASER scanning altimetry over the Netherlands. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 2009, v. 47 (10), pp. 3365-3378.
- GONZALES, R.C.; WOODS, R. E. *Processamento de imagens digitais*. Edgar Blücher Ltda, São Paulo, 2000.
- HAUGERUD, R.A.; HARDING D.J. Some algorithms for virtual deforestation (VDF) of LIDAR topographic survey data. *The International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Annapolis, 2001, v. 34 (3/W4), pp. 211-218.
- HIRATA, Y.; FURUYA, N.; SUZUKI, M.; YAMAMOTO, H. *Airborne LASER Scanning in forest management individual tree identification and LASER pulse penetration in a stand with different levels thinning*. *Forest Ecology and Management*, v. 258 (5), pp. 752-760, 2009.
- IOKI, K.; IMANISHI, J.; SASAKI, T.; MORIMOTO, Y.; KITADA, K. *Estimating stand volume in broad-leaved forest using discrete-return LIDAR: plot-based approach*. *Landscape and Ecological Engineering*, v.6 (1), pp. 29-36, 2010.
- KERSTING, J.; CENTENO, J. A. S.; MACHADO, A. M. L.; PEDRO, P. D. C.

- Filtragem de modelos digitais de superfície derivados de varredura a LASER usando a triangulação de Delaunay. *Série em Ciências Geodésicas*. 5 ed. Curitiba: Curso de pós-graduação em Ciências Geodésicas/UFPR, 2005, v. 5, p. 145-160.
- KOBLER, A.; PFEIFER, N.; OGRINC, P.; TODOROVSKI, L.; OSTIR, K.; DZEROSKI, S. *Repetitive interpolation: A robust algorithm for DTM generation from Aerial LASER Scanner Data in forested terrain*. *Remote Sensing of Environment*, v. 108, pp. 9-23, 2007.
- LOHR, U.; Eibert, M. *The TopoSys Laser-Scanner-System*. Photogrammetrische Woche, Stuttgart, Herbert Wichmann Verlag, Hüthig GmbH, p.263-267, 1995.
- LOHMANN, P.; KOCH, A.; SCHAEFFER, M. Approaches to the filtering of LASER scanner data. *The International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Amsterdam, 2000, v. 33 (B3).
- MACEDO, R. C. *Estimativa de volumétrica de povoamento clonal de Eucaliptos através de LASERscanner aerotransportado*. Dissertação de Mestrado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos – SP, 2009. <Disponível em <http://urlib.net/sid.inpe.br/rep/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2009/02>>.
- OONO, K.; NUMATA, Y.; HIRANO, A.; An improved method individual tree detection using airborne LIDAR application. *International Conference on LIDAR Applications in Forest Assessment and Inventory*, Edinburgh, 2008, v. 8., p. 508-516. Disponível em <http://geography.swan.ac.uk/silviLASER/papers/poster_papers/Oono.pdf>.
- OUDE ELBERINK, S. J.; VOSELMAN, G. *Quality analysis on 3D building models reconstructed from airborne LASER scanning data*. *Journal of photogrammetry and remote sensing*, v. 66 (2), pp. 157-165, 2011.
- PESTANA, D. D.; VELOSA, S. F. *Introdução à Probabilidade e à Estatística*. Fundação Calouste Gulbenkian, 2 ed., 2006.
- ROTTENSTEINER, F.; TRINDER, J.; CLODE, S.; KUBIK, K. *Building detection using LiDAR data and multispectral images*. *Actas da Conferência da ASPRS em Digital Image Computing: Techniques and Applications*, DICTA, Sydney, Dezembro, v. 2, pp. 673–682, 2003.
- SCHIMALSKI, M. B.; MITISHITA, E. A.; NETO, A. C. *Reconhecimento e classificação da cobertura vegetal a partir de informações provenientes do LASER scanning empregando a função discriminante linear de Fischer*. *Pesquisas em Geociências*, v. 2 (36), pp. 141-148, 2009.
- SHIMALESKY, V. *Avaliação da qualidade da informação altimétrica derivada da varredura a LASER em uma região coberta por vegetação: um estudo de caso*. Dissertação de Mestrado pelo Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas - Universidade Federal do Paraná. Curitiba – Paraná, 2007.
- SITHOLE, G. E. G. VOSELMAN. Comparison of Filter Algorithms. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial*

- Information Sciences*, 2003, v. 34 (3/W13), pp. 71-78.
- SITHOLE, G., Filtering of LASER altimetry data using a solpe adaptive filter. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing*, Annapolis, 2001, v. 33 (3/W4).
- THUY, V. E. M. TOKUNAGA. *Wavelet-Based Clustering Method to Detect Building in Urban Area from Airbone LASER Scanner Data*. Conference Proceedings of Map Asia. Bangkok, Thailand, 2002.
- VÖGTLE, T.; STEINLE, E.; Detection and recognition of changes in building geometry derived from multitemporal LASER scanning data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2005, v. 35 (B).
- VOSSelman, G. Slope Based of LASER Altimetry Data. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing*, Amsterdam, 2000, v. 33 (B3), pp 935-942.
- WACK, R.; WIMMER, A. Digital Terrain Models from Airborne LASER Scanner Data – A grid Approach. *International Archives of Photogrammetry. Remote Sensing*, 2002, v. 34 (B3), pp. 293-296.
- WEIDNER, U.; FÖRSTNER, W. *Towards automatic building extraction from high resolution digital elevation models*. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* v. 50 (4), pp. 38–49, 1995.
- WUTKE, J. D.; CENTENO, J. A. S. *Métodos para avaliação da resolução de sistemas de varredura a LASER*. *Boletim de Ciências Geodésicas*, v. 13, p. 151-164, 2007.
- XIAO, J.; GERKE, M.; VOSSelman, G. Automatic detection of buildings with rectangular flat roofs from multi - view oblique imagery. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Paris, France, 2010, v 38 (3A), pp. 251-256.
- XIANG, S.; CHEN, S.; WU, X.; XIAO, D.; ZHENG, X. *Study on fast linear scanning for a new LASER scanner*. *Optics & LASER technology*, v. 42, p. 42-46, 2010.
- ZANDONÁ, D. F.; LINGNAU, C.; NAKAJIMA, W. Y. *Varredura a LASER aerotransportado para estimativas de variáveis dendométricas*. *Scientia Forestalis*, v.36 (80), p. 295-306, 2008.
- (Recebido em julho de 2009. Aceito em setembro de 2011)