

LiDAR: princípios e aplicações florestais

Marcos Giongo¹, Henrique Soares Koehler², Sebastião do Amaral Machado², Flavio Felipe Kirchner², Marco Marchetti¹

¹ Università degli Studi del Molise, C/da Fonte Lappone snc, CAP 86090, Pesche (IS), Itália, marcos@world-forestry.com; marchettimarco@unimol.it; ² Universidade Federal do Paraná, Av. Prefeito Lothário Meissner, 632, CEP 82210-170, Curitiba, PR, Brasil, koehler@ufpr.br; samachado@ufpr.br; kirchner@ufpr.br

Resumo - Uma das primeiras áreas investigadas para o uso comercial do sistema de varredura a laser LiDAR (*Light Detection and Ranging*) foram as aplicações florestais. As informações da topografia e da cobertura florestal são extremamente importantes para os gestores de recursos florestais e naturais. Informações precisas sobre altura das árvores e densidade, além de serem fundamentais, são de difícil obtenção, com a utilização das técnicas convencionais. A tecnologia de varredura a laser, ao contrário das imagens de satélite e de fotografias aéreas, pode simultaneamente mapear o terreno embaixo das árvores, bem como obter a estimativa da altura destas. A utilização da modelagem integrada aos dados LiDAR possibilita, também, estimativas de diversas variáveis florestais, como: área basal, diâmetro, volume, biomassa, carbono e quantidade de material combustível. Apresenta, igualmente, grande potencial nas atividades de planejamento da exploração florestal e construção de estradas. Entretanto, existem ainda muitos desafios a serem superados no desenvolvimento de metodologias e aplicações computacionais mais confiáveis e robustas para a modelagem de dados provenientes deste sensor.

Termos para indexação: Sistema de varredura a laser; inventário florestal, incêndios florestais.

LiDAR: principles and forestry applications

Abstract - One of the first areas investigated for commercial applications of LiDAR was for forest applications. Topography and forest coverage are of extreme importance for forest resources managers. Accurate information on trees height and density, besides being fundamental for planning, are hard to obtain by conventional methods. Laser scanning technology, as opposed to satellite images and aerial photographs, can concurrently map the ground and obtain estimates of trees height. The use of modeling associated with LiDAR data allows to obtain estimates of several other forest variables such as basal area, diameter, volume, biomass and fuel material. Besides these applications, LiDAR technology presents a great potential for planning forest harvesting activities, road construction and maintenance. However, there are great challenges to be overcome in developing technologies and computational applications more robust and reliable for modeling data from this type of sensor.

Index terms: Airborne Laser Scanner system, forest inventory, forest fires.

Introdução

Apesar de o laser não ser uma nova tecnologia, sua utilização na aquisição de dados geográficos é relativamente recente. Seu uso em sistemas LiDAR (*Light Detection and Ranging*) vem demonstrando uma excelente capacidade para a aquisição de uma grande quantidade de informações, em pequeno intervalo de tempo.

A tecnologia LiDAR é baseada nos mesmos princípios utilizados no sistema de RADAR, com a diferença de que, ao invés do uso de ondas de rádio para localizar os objetos de interesse, o sistema LiDAR utiliza pulsos laser. A tecnologia LiDAR foi inicialmente prevista

para a utilização em levantamento de dados para a elaboração de Modelos Digitais de Elevação (MDE), em que os métodos tradicionais não eram suficientes, principalmente em áreas de difícil acesso.

O LiDAR vem demonstrando grande potencial em diversas áreas de aplicação, tais como: planejamento costeiro, avaliação de risco de inundações, telecomunicações e redes de transmissão de energia, florestas, agricultura, petróleo, transportes, planejamento urbano, mineração, entre outros.

O sensor de varredura a laser aerotransportado tem grande potencial para aplicações florestais, em termos de sua capacidade de mobilização de uma grande quantidade de pontos com alta precisão, baixo custo

e alta velocidade de aquisição de dados da estrutura vertical e horizontal das áreas florestais.

O objetivo deste trabalho é fornecer aos profissionais e pesquisadores florestais uma visão geral das metodologias relacionadas ao LiDAR desenvolvidas nos últimos anos e a sua utilização e aplicação em atividades relacionadas ao setor florestal.

Sistemas LiDAR

LiDAR, sigla utilizada para *Light Detection and Ranging*, é um termo que tem sido utilizado para designar esta nova tecnologia de sensoriamento remoto. Em português vem sendo utilizada a terminologia de Sistema de Varredura a Laser (Centeno & Mitishita, 2007; Coelho & Vargas, 2007) ou de Perfilamento a Laser (Castro & Centeno, 2005; Silva & Ribas, 2007). O termo LaDAR (*Laser Detection and Ranging*) também é utilizado, porém, com mais frequência em aplicações militares (Siepmann, 2006).

Schawlow & Townes (1958), pela primeira vez, estabeleceram a teoria para obter a amplificação de luz por emissão estimulada de radiação (laser) com base nos fundamentos estabelecidos por Einstein em 1917. Nas décadas de 1960 e 1970, várias experiências demonstraram o poder de utilização do laser em sensoriamento remoto, incluindo diversas aplicações, como monitoramento atmosférico e estudos oceanográficos (Wehr & Lohr, 1999).

Durante a década de 1980, o laser passou a ser utilizado na medição de distâncias, sendo implementados instrumentos como o *NASA's Atmospheric Oceanographic Lidar* (AOL) e *Airborne Topographic Mapper* (ATM) (Flood, 2001). Mais recentemente, na década de 1990, foram desenvolvidos sensores mais confiáveis, como o *Shuttle Laser Altimeter* (SLA) (Bufton et al., 1995) e o *Mars Observer Laser Altimeter* (MOLA) (Smith et al., 1993; Abshire et al., 2000) usados para medidas em extensas áreas da superfície terrestre e dos oceanos.

Princípios e componentes de funcionamento

O princípio de funcionamento do sistema de varredura laser consiste na emissão de um pulso laser de uma plataforma (aérea, terrestre ou orbital) com uma elevada frequência de repetição. O tempo de retorno dos pulsos laser entre a plataforma e os alvos é medido pelo sensor, permitindo a estimativa destas distâncias (Baltsavias, 1999; Wagner et al., 2004).

O sistema LiDAR apresenta sua própria fonte de energia, neste caso, uma fonte de luz, o laser, a qual emite radiação eletromagnética em ondas curtas (1-10 μm) sendo sensível às perturbações atmosféricas (Andersen et al., 2006) e, assim, é considerado um método direto na captura de dados e classificado como um sensor ativo.

Uma vantagem dos sensores de varredura a laser em relação aos clássicos sensores passivos (fotografias aéreas e imagens de satélite) é que os scanners a laser não dependem do sol como uma fonte de iluminação. Sendo assim, a análise dos dados não é prejudicada por sombras causadas por nuvens ou objetos vizinhos (Wagner et al., 2004). Outra característica importante deste sensor é que os pulsos de laser podem penetrar por pequenas aberturas no dossel da floresta e fornecer informações sobre a estrutura florestal e também sobre o relevo destas áreas.

Os sistemas ALS (*Airborne Laser Scanner*) são compostos por um sensor laser que essencialmente registra o tempo entre o sinal emitido e recebido de um determinado ponto, um Sistema Inercial de Navegação (*INS – Inertial Navigation System*) e um receptor GPS em uma plataforma aerotransportada. Em terra, é necessária uma rede de GPS que trabalhe de forma conjunta ao GPS instalado na plataforma (Figura 1).

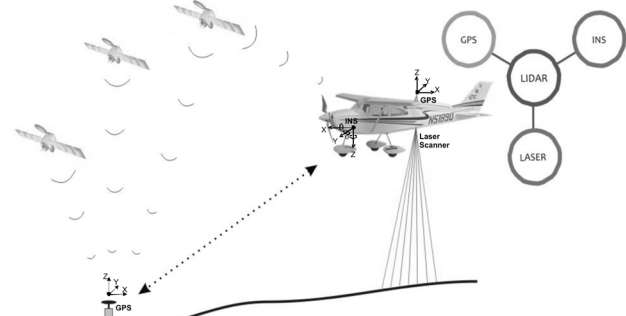


Figura 1. Princípios e componentes de um sistema ALS.

O conjunto total de informações é armazenado e processado, resultando em pontos com extrema precisão (x, y e z), que correspondem a superfícies e objetos presentes no terreno.

Sensor laser

Os primeiros sistemas ALS foram desenvolvidos em um sistema de pulsos (*discrete echo*), o qual registra o intervalo para o primeiro ou o último retorno dos pulsos. A evolução dos sistemas permitiu o armazenamento simultâneo de ambos os ecos e alguns sistemas mais avançados permitem determinar o retorno dos pulsos intermediários (Figura 2).

Nos últimos anos, uma nova geração de sistemas ALS foi desenvolvida, conhecida como sistema de ondas contínuas (*full-waveform*), sendo capazes de registrar integralmente todo o sinal do pulso (Figura 02) (Wagner et al., 2006).

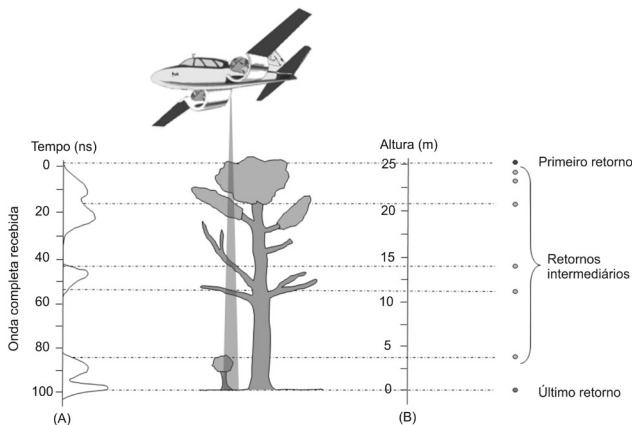


Figura 2. Característica dos diferentes sistemas ALS, (A) sistema de ondas contínuas (*full-waveform*) e (B) sistema de pulsos (*discrete echo*).

O sistema receptor do sinal laser recebe um sinal analógico de retorno e, por meio de um conversor analógico/digital, transforma o sinal analógico em

digital, sendo que o sinal digital da radiação refletida passa por um filtro de suavização que verifica se o sinal recebido possui a mesma intensidade do sinal emitido.

Outro parâmetro que define o funcionamento do sensor é o mecanismo utilizado no conjunto ótico do sistema. Após o pulso ser gerado, ele é dirigido para o espelho de varredura. Um conjunto ótico de lentes e espelhos orienta os pulsos laser gerados pelo gerador de pulsos, emitindo-os para os objetos no terreno e sequencialmente recebendo os sinais de retorno e direcionando-os para o receptor.

Na Figura 3 pode-se observar as diversas configurações do espelho de varredura: espelho oscilante; polígono rotatório; varredura Palmer e varredura de fibras rotatórias (Wehr & Lohr, 1999).

Os espelhos oscilantes produzem uma varredura dos pontos com uma disposição em forma de “zig-zague”; os espelhos oscilantes com dois eixos produzem em forma de “U”; os espelhos de polígono de rotação produzem uma varredura unidirecional em forma de linhas paralelas; o Palmer produz uma varredura com forma elipsóide e a varredura de fibra rotatória produz uma disposição muito similar ao polígono de rotação (Figura 4).

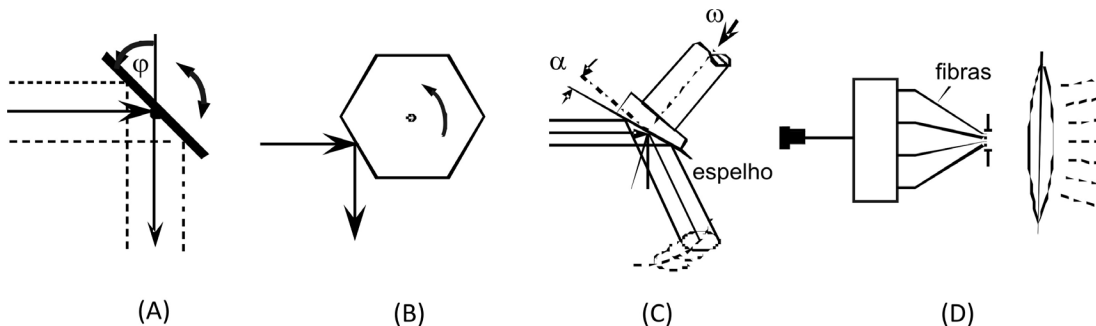


Figura 3. Mecanismos do espelho de varredura ótico mecânico. (A) Espelho oscilante; (B) Polígono rotatório; (C) Varredura Palmer e (D) Varredura de fibras rotatórias. Fonte: Adaptado de Wehr & Lohr, (1999).

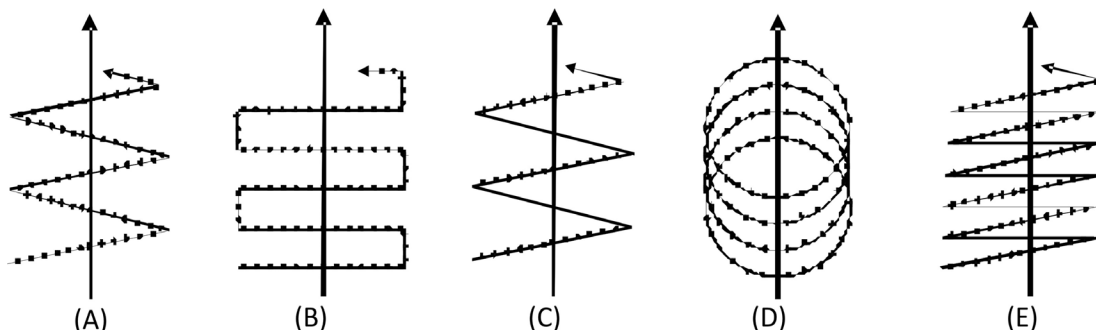


Figura 4. Configuração da varredura em relação ao tipo de espelho ótico mecânico. (A) Espelho oscilante; (B) Espelho oscilante com dois eixos; (C) Polígono rotatório; (D) Varredura Palmer e (E) Varredura de fibras rotatórias. Fonte: Adaptado de Wehr & Lohr (1999).

Sistema de Navegação Inercial (INS)

Um Sistema de Navegação Inercial (*Inertial Navigation System - INS*) utiliza uma Unidade de Medição Inercial que contém arranjos de sensores inerciais (*Inertial Sensors Array - ISA*). Estes arranjos devem conter conjuntos de acelerômetros para a medição de força específica e conjuntos de giroscópios para detecção de movimentos de rotação (Lima, 2005).

A unidade de medição inercial (*IMU – Inertial Measurement Unit*) é constituída por uma série de acelerômetros e giroscópios, com um circuito de digitalização e uma unidade de cálculo. Por meio de integradores, as acelerações e os parâmetros angulares no sistema de navegação inercial produzem a posição, a velocidade e a orientação do IMU. Ou seja, os giroscópios mantêm os acelerômetros em posição horizontal com o terreno, fornecendo a orientação azimutal, enquanto os acelerômetros colocados na plataforma fornecem as componentes específicas da aceleração.

Os integradores recebem as indicações dos acelerômetros e fornecem a velocidade e a distância. A instalação rigorosa de um sistema IMU num sensor remoto produz a posição, a velocidade e a orientação do próprio sensor e para assegurar uma boa exatidão, o IMU deve ser pequeno e o mais leve possível, de modo a poder ser instalado o mais perto possível do sensor (Mostafa & Hutton, 2001).

Sistema de Posicionamento Global (GPS)

O objetivo do GPS é a determinação da posição da plataforma aerotransportada. Para alcançar maiores precisões, utiliza-se na plataforma um receptor de GPS de dupla frequência (L1 e L2), e na terra se estabelece uma rede de estações GPS que realizam observações simultâneas.

Nas observações obtidas pelo GPS da plataforma, são aplicados métodos de correções diferenciais de posicionamento que consistem de correção baseada em estações de referência geradas a partir de observações da fase do código, da portadora, ou do código suavizado pela portadora. A aplicação desta técnica com a observação da fase da portadora é capaz de gerar resultados com elevada exatidão; entretanto, as correções tornam-se menos efetivas à medida que se aumenta a distância entre a estação móvel e a de referência, degradando progressivamente a qualidade do posicionamento (Ramos et al., 2007).

As técnicas de posicionamento RTK (*Real Time Kinematic*) ou DGPS (*Differential GPS*) são baseadas no modo diferencial em que as correções dos sinais dos satélites GNSS (Sistemas Globais de Satélite de Navegação) são transmitidas, em tempo real, da estação de referência para uma estação a qual se deseja determinar as coordenadas. Normalmente, as correções são transmitidas via rádio UHF, instalado juntamente com um receptor, em uma estação de coordenadas conhecidas, aos receptores móveis (Costa et al., 2008).

A aplicação das correções diferenciais baseadas no uso de técnica de GPS-RTK apresenta sérias limitações em função do raio de alcance das transmissões das correções. Desta forma, uma alternativa é o pós-processamento dos dados com base nas observações obtidas das bases instaladas em terra. Entretanto, é recomendado que as bases utilizadas apresentem uma distância máxima de 20 km em relação à área sobrevoada.

Apesar da distância da base ser um fator muito importante, outras condições são necessárias para a obtenção de uma elevada exatidão dos pontos levantados com o uso dos sistemas ALS, como, por exemplo, a presença de, no mínimo, cinco satélites e um PDOP (*Position Dilution of Precision*) inferior a quatro (Gutierrez et al., 2001).

Principais aplicações ALS no Brasil

Guiera et al. (2005) analisaram dados provenientes deste sensor para a classificação de linhas de transmissão de energia elétrica e obtenção de suas alturas com a utilização de classificação por *fuzzy c-means* e a transformada de Hough, tendo obtido resultados satisfatórios com uma pequena margem de erro.

Kersting et al. (2005) avaliaram um método de redução dos pontos oriundos da aquisição de modelos digitais de superfície por LiDAR, baseado na análise de superfícies poligonais definidas por uma rede irregular de triangulação. Verificou-se que este processo computacional gera modelos mais compactos, com tamanho muito mais reduzido do que os originais e com pouca perda de informações, garantindo uma boa relação custo benefício em termos de esforços computacionais e do espaço necessário para o armazenamento dos modelos resultantes.

Centeno e Mitshita (2007) utilizaram a varredura a laser em ambientes urbanos e observaram que o sistema oferece grandes vantagens para a obtenção de informações a respeito das construções e que a maior

vantagem é que os dados, de natureza geométrica, são complementares aos dados espectrais, tradicionalmente empregados no sensoriamento remoto.

Sallem Filho (2007) avaliou os dados provenientes deste sensor no mapeamento de dutos, demonstrando que a utilização de dados provenientes desta plataforma aerotransportada apresenta ganhos e vantagens, sem prejuízos à precisão.

Na área florestal, algumas pesquisas vêm explorando o potencial de aplicação desta nova tecnologia. Miqueles & Centeno (2003) demonstraram a viabilidade da identificação de diferentes tipos de vegetação com dados LiDAR, em uma área de vegetação urbana, usando técnicas de classificação “orientada a objeto” com o uso do software eCognition®.

Alixandrini (2005) utilizou dados ALS para obter informações ligadas a diferentes estratos da cobertura vegetal, analisando o comportamento e a estimativa das alturas. Castro & Centeno (2005) aplicaram a segmentação de imagens geradas por perfilamento a laser para a delimitação de árvores individuais em uma área de reflorestamento de eucaliptos. Zandoná et al. (2008), aplicando uma metodologia desenvolvida

por Tiede et al. (2005) para a identificação de árvores individuais, sobretudo as árvores que se encontram no dossel superior (dominantes e codominantes), obtiveram um acerto médio de 82,8%.

Mais recentemente, Macedo (2009) utilizou dados do ALS para estimativas volumétricas de povoamento clonal de *Eucalyptus* sp., obtendo um valor 1,8% menor que o volume estimado com o uso de técnicas tradicionais de inventário florestal.

Aplicações LiDAR em florestas

A tecnologia LiDAR tem grande potencial para realizar medidas diretas e estimativas de variáveis dendrométricas (Nilsson, 1996). As medições diretas obtidas dos dados LiDAR são as alturas do dossel da floresta, ou seja, a topografia das copas.

Outras características estruturais importantes da floresta, como a biomassa da parte aérea, área basal e diâmetro podem ser obtidos por técnicas de modelagem e/ou estimadas a partir de medições diretas (Tabela 1) (Dubayah et al., 2000).

Tabela 1. Contribuições potenciais da tecnologia LiDAR em aplicações florestais.

Parâmetros Florestais	Forma de obtenção de dados ALS	Exemplo de aplicação na literatura
Altura do dossel e/ou árvores individuais	Medida direta	Næsset (1997)
Volume de copa	Medida direta	Coops et al. (2007)
Diâmetro de copa	Medida direta	Roberts et al. (2005)
Número de indivíduos	Medida direta	Hirata et al. (2009)
Volume	Modelagem	Ioki et al. (2010)
Biomassa	Modelagem	Danilin & Medvedev (2004)
Carbono	Modelagem	Balzter et al. (2007)
Área basal	Modelagem	-
Diâmetro à altura do peito (DA)	Modelagem	-
Material combustível aéreo	Modelagem	Andersen et al. (2005)
Cobertura de copa	Fusão com outros sensores	-
Identificação de espécies	Fusão com outros sensores	Kim (2007)

Estimativas de alturas

A estimativa da altura da cobertura florestal pode ser obtida diretamente a partir do processamento dos dados provenientes da varredura laser (Nilsson, 1996). O primeiro retorno do pulso laser (*first*), em áreas de cobertura florestal, corresponde, na maioria dos casos, aos pontos mais altos das copas das árvores (Lim et

al., 2001). Desta forma, o modelo digital de superfície (MDS) pode ser obtido com os pontos mais altos dentro de uma vizinhança definida, existindo diversas variações de metodologias descritas em literatura (Sithole & Vosselman, 2003).

Informações obtidas do último retorno (*last*) apresentam alta probabilidade de corresponderem à

superfície do terreno, entretanto, com a presença de muitos pontos da cobertura vegetal. Para a elaboração do modelo digital de elevação (MDE), é necessária a eliminação dos pontos relativos à vegetação, o que pode ser realizado por meio de diferentes técnicas matemáticas/estatísticas (Kraus & Pfeifer, 1998).

Para a extração das alturas das árvores dos dados da varredura a laser, normalmente, é utilizado um modelo digital da vegetação normalizado (MDVn), que pode ser obtido a partir de um processo matemático matricial muito simples, consistindo na subtração do MDS do MDE.

Suárez et al. (2005) apontam uma vantagem no uso de MDVn, obtidos com o uso de técnicas de interpolação: proporcionam uma significativa redução do volume dos dados, aumentando a velocidade de processamento e também a possibilidade da utilização de técnicas e aplicações computacionais convencionais utilizadas tradicionalmente em sensoriamento remoto e GIS.

A qualidade das estimativas das alturas obtidas por dados da varredura a laser está relacionada diretamente à qualidade dos modelos utilizados (MDE e MDS) na elaboração do MDVn. Para a obtenção de modelos de qualidade em áreas florestais, é necessária uma cobertura adequada dos pulsos laser, para que os mesmos possam penetrar na vegetação, através dos espaços existentes entre as folhas e galhos, chegando, finalmente, à superfície do terreno.

Segundo Hyypä et al. (2004), estes estudos apresentam-se muito complexos, pois a densidade dos pontos está relacionada a diversos fatores, tais como: a altura de voo; tipo de sensor; tipologia florestal; e dos algoritmos utilizados no processamento dos dados.

Alguns estudos evidenciam que as alturas obtidas com dados LiDAR podem ser subestimadas (Nilsson, 1996; Persson et al., 2002; Andersen et al., 2006; Falkowski et al., 2006; Packalén, 2009). De acordo com todos estes estudos, a subestimativa das alturas das árvores pode ser causada por diversos fatores, tais como: densidade e cobertura dos pulsos laser; densidade e altura da vegetação e sub-bosque; espécies e forma das árvores presentes; algoritmos utilizados na elaboração dos MDE e MDS; sensibilidade do sensor laser e a taxa de penetração dos pulsos.

Yu et al. (2004) avaliaram o efeito dos parâmetros de sistema ALS, tais como a altitude de voo, a densidade de pontos e o diâmetro da projeção do feixe sobre a superfície (*footprint*) sobre a estimativa das alturas das árvores. Os resultados indicaram que a precisão das estimativas das alturas das árvores diminuiu com o aumento da altitude de voo. Outro aspecto relevante foi que a densidade de pontos exerce uma maior influência na precisão das estimativas das alturas do que a dimensão do *footprint*.

Apesar de a maioria dos trabalhos evidenciarem uma tendência de subestimativa das alturas das árvores com o uso dos dados da varredura a laser, alguns trabalhos demonstraram superestimativas (Hirata, 2004; Dean et al., 2009). Hirata (2004) constatou que a superestimativa das alturas das árvores de um dos talhões estudados foi resultado do fato de as árvores estarem crescendo em declive, tendendo a inclinar-se para o lado do vale.

Os estudos referentes à utilização do sensor laser vêm demonstrando uma grande potencialidade de aplicação na estimativa das alturas. Na Tabela 2, observam-se os resultados obtidos em alguns destes trabalhos.

Tabela 2. Resultado de alguns trabalhos com dados LiDAR na estimativa de alturas.

Tipologia florestal presente	Localização da área de estudo	Densidade de pulsos laser (pnt m ⁻²)	Footprint (m)	Metodologia de obtenção em campo das alturas	Resultados obtidos	Referência
Florestas com <i>Picea abies</i> L. Karst. e <i>Pinus sylvestris</i> L.	Elverum e Grue, Noruega	-	0,13 e 0,16	Medidas em campo, e cálculo da altura média aritmética de cada talhão	Melhores resultados: erro -0,4 m a 1,9 m com um desvio padrão de 1,1-1,6 m	Næsset (1997)
Povoamento equiano de <i>Pinus sylvestris</i> L.	Ålö (50 km a sudeste de Estocolmo), Suécia	-	0,75 – 3,00	Medidas em campo, e cálculo da altura média aritmética do dossel	Subestimativa variando de 2,1 a 3,7 m	Nilsson (1996)
Talhões de <i>Picea sitchensis</i> (Bong.)	Aberfoyle, United Kingdom	3-4	--	Relascópio a Laser	R ² : 0,89 – Subestimativa variando de 7-8%	Suárez et al. (2005)
Plantações de <i>Pinus taeda</i> L.	Mississippi (a) e Texas (b), USA	4-5	0,11	Modelos de regressão	Média: -0,5(a)/+0,2(b) – RMSE: 0,48(a) / 1,18(b)	Roberts et al. (2005)
Reflorestamento de <i>Pinus</i> spp.	Pinhais, Paraná, Brasil	--	0,27	hipsômetro de Haga	Subestimativas das alturas dos talhões de 0,10 a 8,8% de erro	Zandoná et al. (2008)

R²: coeficiente de determinação e RMSE: Root mean square deviation

Identificação de árvores individuais

A identificação automática de árvores individuais, em dados da varredura a laser, é um ponto crucial em estudos que tenham como objetivo extrações de informações dendrométricas individuais. O processo de reconhecimento das árvores individuais é, normalmente, uma das primeiras atividades realizada no MDVn. A localização das árvores possibilita a obtenção de outras variáveis dendrométricas, como por exemplo, a altura.

Vários estudos para a detecção automática de árvores individuais utilizando dados da varredura a laser vêm sendo desenvolvidos nos últimos anos, sendo que na sua maioria tem sido utilizado o MDVn para extrair e localizar as árvores individuais (Persson et al., 2002; Tiede et al., 2005; Oono et al., 2008).

Um problema na detecção de árvores individuais em imagens ou em modelos digitais, principalmente em florestas naturais, é a manipulação de copas de diversos tamanhos. Outro aspecto importante é a necessidade de uma resolução compatível da imagem/modelo com o tamanho das copas presente na área de estudo.

Em imagens aéreas ou multiespectrais de alta resolução é difícil obter informações referentes às dimensões das árvores, o que não ocorre com os modelos

digitais provenientes da varredura a laser, onde essas informações encontram-se diretamente disponíveis. Isso permite desenvolver métodos de processamento que se adaptem aos tamanhos dos objetos de interesse, no caso, as árvores (Pitkänen et al., 2004). Næsset e Økland (2002) destacam que outra variável importante para a identificação de árvores individuais é o diâmetro do pulso laser (*footprint*), sendo que diâmetros menores apresentam melhores resultados, pois proporcionam uma maior penetração na cobertura vegetal, principalmente em áreas de floresta densa.

Taguchi et al. (2006) utilizaram o algoritmo de locais máximas para a identificação dos topos das árvores e, para a detecção das árvores, foi utilizado um modelo de forma elipsóide em uma floresta de coníferas, no Japão, onde 74% do total das árvores foram detectadas corretamente.

Tiede et al. (2005), após várias pré-etapas de processamento com os dados LiDAR, aplicaram o algoritmo de locais máximas para seis parcelas e as árvores dominantes foram detectadas com uma precisão de 72,2%, representando uma taxa total de detecção das árvores de 51%. Nas áreas com espaçamentos maiores, as árvores dominantes detectadas atingiram

valores entre 81% e 92%, com um erro de comissão de aproximadamente 2%.

Kwak et al. (2007), utilizando métodos de análise morfológica para a identificação de árvores individuais, na Coreia do Sul, com predominância de três espécies arbóreas: *P. koraiensis*, *L. Leptolepis* e *Quercus* spp. (Oaks) obtiveram, respectivamente, 68,1%, 86,7% e 67,4% de precisão na detecção.

Oono et al. (2008) desenvolveram um método para a identificação automática de árvores individuais, denominado de “*Crown Shape Index*” (índice de forma de copa). O índice é calculado com base na desigualdade das alturas da grade do MDVn, em que, com o uso de procedimentos baseados na teoria estatística, são extraídas as áreas de copa no entorno dos topos das árvores. A metodologia foi aplicada em quatro parcelas com diferentes densidades ($n \text{ ha}^{-1}$) em uma floresta plantada de *Cryptomeria japonica*. Nas áreas de menor densidade (860 n ha^{-1}) obteve-se 80% a 89% de precisão na detecção. Nas áreas com maior densidade de árvores, a detecção variou de 71% a 87%.

Estimativas em escala de talhão

A tecnologia LiDAR vem demonstrando ter grande potencial para a estimativa em extensas áreas florestais, principalmente em áreas de difícil acesso. Entretanto, a utilização de dados da varredura a laser não elimina totalmente as atividades de campo, pois as estimativas precisam ser ajustadas com dados coletados nas áreas objeto de estudo. Países como Canadá, Estados Unidos, Noruega, Finlândia, Suíça e Alemanha vêm liderando as pesquisas sobre a aplicação do sensor LiDAR na área florestal.

A Noruega está usando essa tecnologia em seu Inventário Florestal Nacional, em cerca de 20% de sua área florestal. Outros países como a Suíça e Finlândia estão estudando a possibilidade de aplicação do LiDAR em nível nacional (Carson et al., 2004).

Um dos primeiros trabalhos na estimativa, em escala de talhões, com dados de um sistema ALS, foi realizado por Nilsson (1996), que utilizou diversos diâmetros do pulso laser (*footprint*) (entre 0,75 m e 3,0 m) para a estimativa da altura média e volume em um talhão equiâneo de *Pinus sylvestris*, na Suécia. As alturas obtidas dos dados ALS apresentaram uma subestimativa de 2,1-3,7 m e os volumes foram estimados por meio de equação empírica com uso das alturas obtidas com a varredura laser, com uma boa correlação ($R^2 = 0,78$).

Næsset (1997) avaliou dados do sensor laser com medidas de alturas de talhões obtidas em campo. Foram avaliadas as alturas médias de todas as árvores, a média ponderada (em função de sua própria altura e o quadrado de sua altura) e, por fim, uma média das maiores árvores. Como resultado, todas as alturas dos talhões avaliados apresentaram subestimativa em relação às medições de campo.

A abordagem de obtenção de informações para inventário florestal foi mais explorada por Means et al. (2000) em uma área florestal localizada no Oregon (Estados Unidos), em talhões com *Pseudotsuga menziesii* (Mirbel) Franco. Os resultados demonstraram altas correlações entre os dados de campo e as estimativas dos dados LiDAR. Os modelos para estimativas da altura média, área basal e volume apresentaram, respectivamente, os seguintes coeficientes de correlação: 0,93, 0,95 e 0,97.

Næsset (2002) empregou uma metodologia de dois estágios em uma área de floresta na Noruega composta principalmente por duas espécies arbóreas (*Picea abies* e *Pinus sylvestris*). Inicialmente, em algumas áreas amostrais, foram realizados levantamentos de campo com uso de técnicas tradicionais de inventário florestal para a medição de variáveis dendrométricas. As variáveis obtidas em campo foram relacionadas com as estimativas obtidas com os dados da varredura laser usando regressões múltiplas. As regressões apresentaram bons ajustes, em que foi explicado: 82-97% da altura média, 74-93% da altura dominante, 39-78% do diâmetro médio, 50-68% do número de árvores, 69-89% da área basal e 80-93% do volume. Estes modelos foram, então, utilizados para obter as informações florestais em toda a área abrangida pelos dados da varredura laser (cerca de 1.000 ha). Sequencialmente, foram validados pelo uso de diferentes áreas amostrais utilizadas nos ajustes iniciais, em que se obteve os seguintes desvios-padrão: altura média (0,61-1,17 m), altura dominante (0,70-1,33 m), diâmetro médio (1,37-1,61 cm), número de árvores (16,9-22,2%; $128-400 \text{ n ha}^{-1}$), área basal (8,6-11,7%; $2,33-2,54 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$) e volume (11,4-14,2%; $18,3-31,9 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$).

Ioki et al. (2010) realizaram estudos para a estimativa do volume de uma área de floresta temperada composta de espécies folhosas, no oeste do Japão, com o uso de dados LiDAR. Inicialmente, dentro das 20 parcelas avaliadas, foram estimadas as variáveis dendrométricas com os dados da varredura a laser, as quais foram

utilizadas para a confecção de modelos empíricos para a estimativa dos volumes. Dos 23 modelos avaliados, o melhor resultado apresentou $R^2=0,75$ e um erro da estimativa de $41,90 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, o que correspondeu a um erro total de 16,4% do volume.

Incêndios florestais e modelagem de material combustível

Nos últimos anos, o uso da varredura a laser para o mapeamento da estrutura e quantificação do material combustível florestal vem sendo objeto de vários trabalhos de pesquisa.

Riaño et al. (2003) utilizaram dados LiDAR para a estimativa de parâmetros florestais importantes para a modelagem do comportamento do fogo. Os parâmetros avaliados foram: altura das árvores, cobertura arbórea, altura do dossel, superfície de cobertura do dossel e densidade das copas das árvores. A estimativa da cobertura arbórea foi realizada com os pulsos laser que atingiram as copas das árvores, enquanto que a superfície da cobertura do dossel utilizou somente os pulsos que atingiram a superfície da cobertura vegetal. A densidade das copas foi calculada com base na biomassa foliar e volume de copa. Segundo esses autores, a aplicação desta tecnologia pode gerar informações dos combustíveis florestais com alta precisão, com duas vezes menos custos e 3,5 vezes menos tempo de coleta e elaboração que as metodologias usadas tradicionalmente.

Mörsdorf et al. (2004) avaliaram a eficiência da utilização de dados LiDAR para a determinação da estrutura superior do dossel florestal em nível de árvores individuais para a utilização na avaliação de comportamento do fogo. Foram estimadas as posições das árvores individuais, suas respectivas alturas e diâmetros de copas e, sequencialmente, comparados com os dados obtidos em levantamentos de campo. Os resultados foram bastante satisfatórios para a estimativa do número de árvores e das alturas individuais, porém os diâmetros de copas não apresentaram boas relações com os obtidos em campo em função, provavelmente, de erros realizados nas medições de campo. O estudo indicou que a utilização de modelo em nível de árvore individual poderá aumentar sensivelmente os trabalhos de modelagem do comportamento do fogo, e que, caso necessário, estes mesmos modelos podem ser replicados em grandes áreas, permitindo, assim, uma abordagem mais ampla.

Andersen et al. (2005), nos Estados Unidos, aplicaram análise de regressão, entre os dados LiDAR e dados

coletados em campo para o desenvolvimento de modelos de estimativas do peso do material combustível das copas das árvores, densidade das copas, altura da base do dossel e altura total do dossel. O estudo demonstrou fortes relações entre as estimativas obtidas com os dados LiDAR e os dados coletados em campo, onde: o peso do material combustível da copa apresentou um $R^2 = 0,86$; a densidade da copa um $R^2 = 0,84$, a altura da base do dossel um $R^2 = 0,77$ e a altura total do dossel um $R^2 = 0,98$.

Em 2006, na Austrália, o *Forests New South Wales* (FNSW) avaliou a aplicação LiDAR no mapeamento de quantificação e caracterização dos materiais combustíveis florestais na Bacia Hidrográfica de Jilliby. Com os dados obtidos nos levantamentos de campo comparados aos obtidos pela varredura laser foram desenvolvidos modelos para estimar as características do material combustível em toda a área de estudo. Os resultados demonstraram uma forte correlação entre as estimativas obtidas com os dados LiDAR e os coletados em campo: carga do material combustível do sub-bosque ($R = 0,73$, $R^2 = 0,54$), materiais combustíveis das copas ($R = 0,75$, $R^2 = 0,56$) e o volume de material combustível ($R = 0,74$, $R^2 = 0,54$) (Turner, 2007).

Mais recentemente, Mutlu et al. (2008) avaliaram o uso de diversas técnicas de fusão de dados LiDAR com imagens multispectrais para a avaliação do material combustível, bem como a espacialização destas informações. Os resultados obtidos demonstraram grande potencialidade no fornecimento de estimativas precisas em extensas áreas florestais.

Além dos atributos descritos anteriormente, o sistema de varredura a laser permite o desenvolvimento MDE com alta precisão, a possibilidade de localização dos cursos d'água (Bowen & Waltermire, 2002) e de áreas de clareiras, que podem auxiliar nos planejamentos necessários para a redução de incêndios florestais e, também, nas atividades relacionadas ao seu combate.

Caracterização da vegetação e identificação de espécies

A fusão de dados ALS com imagens de sensores multispectrais vem se mostrando bastante promissora, principalmente na caracterização da vegetação e identificação de espécies (Popescu et al., 2004; Koetz et al., 2007), pois os dois tipos de sensores juntos fornecem diferentes informações e a interação se comporta de forma complementar. Alguns sistemas ALS já vêm sendo operados de forma integrada, onde se permite a coleta

de dados do sensor laser e geração de ortofotos.

Segundo Koetz et al. (2007), o princípio de medição do sistema LiDAR é particularmente mais adequado para a avaliação da estrutura horizontal e vertical das florestas, enquanto as informações espectrais de imagens óticas apresentam boas relações com as propriedades biofísicas e químicas da floresta.

Popescu & Wynne (2004) utilizaram a fusão de dados ALS e dados ópticos multiespectrais como apoio na diferenciação da tipologia florestal, melhorando suas estimativas da altura das árvores.

Trabalhos realizados por Holmgren & Persson (2004), com o uso de uma alta densidade de pontos da varredura a laser, medindo a estrutura e a forma das copas das árvores, permitiram a diferenciação de duas espécies de coníferas (*Picea abies* e *Pinus sylvestris*), as quais em imagens multiespectrais apresentam respostas espectrais muito semelhantes.

Kim et al. (2009) analisaram os dados de intensidade registrados para cada ponto da varredura a laser para a identificação das espécies de árvores. Neste trabalho, foram avaliadas oito espécies de folhosas e sete de coníferas e o valor de intensidade para diferentes espécies arbóreas variou em função das características de sua folhagem. Foi também observado, neste estudo, que em áreas com cobertura fechada, onde as copas de árvores se sobrepõem, a capacidade de discriminar as espécies folhosas e coníferas, com base em valores de intensidade de retorno, é mais problemática e varia de acordo com as configurações do sensor LiDAR.

Exploração e planejamento de estradas florestais

Yu et al. (2004) demonstraram aplicação do uso do sistema laser aerotransportado para a estimativa de crescimento florestal e o monitoramento da exploração florestal. Foram desenvolvidos algoritmos para a detecção de árvores cortadas, sendo também avaliado o crescimento das florestas. Na área objeto de estudo foram cortadas 83 árvores, das quais 61 puderam ser detectadas automaticamente com os dados do sistema LiDAR. As árvores maduras colhidas foram todas detectadas; entretanto, falhas foram verificadas com relação às árvores menores.

Aruga et al. (2005), com base no MDE de alta resolução, elaborado com dados LiDAR, desenvolveram um sistema para o planejamento de estradas florestais. O MDE foi utilizado para os cálculos de volume de terraplenagem e, sequencialmente, foram analisados por comparação com os volumes de terraplenagem exatos.

Segundo o autor, a precisão e a alta resolução do MDE proveniente de dados LiDAR, o torna uma ferramenta muito útil para o planejamento de estradas florestais, e também produz uma significativa redução nos trabalhos de campo que normalmente são muito extensos.

Considerações finais

Nos últimos anos, observa-se um grande aumento nos trabalhos de pesquisas das aplicações LiDAR. Isso se deve, principalmente, às vantagens da utilização deste sensor na captura das informações tridimensionais da superfície da terra, em especial em áreas com características complexas.

É também evidente que o desenvolvimento de metodologias para o processamento dos dados provenientes deste sensor vem permitindo um forte aumento de suas aplicações e usos, observando-se cada vez mais frequentes aplicações operacionais e práticas. Na área florestal, isto também já é realidade. Em muitos países vem sendo utilizado operacionalmente em diversas aplicações florestais, em especial, em inventários nacionais e regionais.

A evolução das tecnologias utilizadas nos sistemas LiDAR é outro ponto muito importante, pois se observa uma grande evolução nos últimos anos e existem fortes indícios da manutenção desta tendência para os próximos anos (Xiang et al., 2010).

Recentemente, foi desenvolvido, por uma instituição francesa, um sistema ALS operado em um ultraleve (Cuesta et al., 2009). O instrumento possibilita medir as características do dossel da floresta com grande flexibilidade, tanto em termos de capacidade, adaptação dos parâmetros instrumentais e plano de voo. Além do sensor laser, o sistema contém duas câmeras que operam em três faixas (ultravioleta, visível e infravermelho próximo). Esta experiência, mesmo que em forma de um protótipo, pode ser considerada como alternativa futura muito interessante, possibilitando uma maior viabilidade de utilização do LiDAR em áreas florestais pois, normalmente, os custos de aquisição de dados LiDAR estão relacionados com os custos do voo (Cuesta et al., 2009).

Existem ainda muitos desafios a serem superados com a utilização do sensor LiDAR para as aplicações florestais, tornando-se fundamental os avanços das pesquisas, principalmente o aprimoramento e desenvolvimento de metodologias que possam viabilizar sua aplicação em extensas áreas. A contínua evolução

da tecnologia empregada nos sistemas LiDAR tornará viável a aplicação em muitas áreas e seguramente proporcionará novos desafios para desenvolvimento de métodos e técnicas de manipulação destes dados.

Referências

- ABSHIRE, J. B.; SUN, X.; AFZAL, R. S. Mars Orbiter Laser Altimeter: receiver model and performance analysis. **Applied Optics**, v. 39, n. 15, p. 2449-2460, 2000.
- ALIXANDRINI, M. J. **Estimativa da altura da vegetação utilizando dados airborne laser scanner**. 2005. 68 f. (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- ANDERSEN, H.-E.; MCGAUGHEY, R. J.; REUTEBUCH, S. E. Estimating forest canopy fuel parameters using LIDAR data. **Remote Sensing of Environment**, v. 94, n. 4, 28, p. 441-449, February 2005.
- ANDERSEN, H.-E.; REUTEBUCH, S. E.; MCGAUGHEY, R. J. A rigorous assessment of tree height measurements obtained using airborne LiDAR and conventional field methods. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 32, n. 5, p. 355-366, 2006.
- ARUGA, K.; SESSIONS, J.; AKAY, A. E. Application of an airborne laser scanner to forest road design with accurate earthwork volumes. **Journal of Forest Research**, v. 10, n. 2, p. 113-123, 2005.
- BALTSAVIAS, E. P. A comparison between photogrammetry and laser scanning. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 54, n. 2-3, p. 83-94, 1999.
- BALZTER, H.; ROWLAND, C. S.; SAICH, P. Forest canopy height and carbon estimation at Monks Wood National Nature Reserve, UK, using dual-wavelength SAR interferometry. **Remote Sensing of Environment**, v. 108, p. 227-239, 2007.
- BOWEN, Z. H.; WALTERMIRE, R. G. Evaluation of light detection and ranging (LiDAR) for measuring river corridor topography. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 38, n. 1, p. 33-41, 2002.
- BUFTON, J.; BLAIR, B.; CAVANAUGH, J.; GARVIN, J.; HARDING, D.; HOPF, D.; KIRKS, K.; RABINE, D.; WALSH, N. Shuttle Laser Altimeter (SLA): a pathfinder for space-based laser altimetry and LiDAR. In: Shuttle Small Payloads Symposium, **Proceedings....**, 1995. p. 83-91.
- CARSON, W. W.; ANDERSEN, H.-E.; REUTEBUCH, S. E.; MCGAUGHEY, R. J. LiDAR applications in forestry: An overview. In: ANNUAL ASPRES CONFERENCE PROCEEDINGS, 2004, Denver, Colorado. **Proceedings**. Colorado: American Society of Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, MD. Disponível em: < http://forsys.cfr.washington.edu/JFSP06/publications/Carson_et_al_2004.PDF>. Acesso em: 23 jun. 2009.
- CASTRO, F. C. E.; CENTENO, T. M. Segmentação de imagens geradas por perfilamento a laser para delimitação de árvores individuais em uma área de reflorestamento de eucaliptos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia. Anais. São José dos Campos: INPE, 2005. p. 737-744.
- CENTENO, J. A. S.; MITISHITA, E. A. Laser scanner aerotransportado no estudo de áreas urbanas: A experiência da UFPR. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007, Florianópolis. Anais... São José dos Campos: INPE, 2007. p. 3645-3652.
- COELHO, A. H.; VARGAS, R. M. A. Geração de modelos digitais de terreno a partir de dados de laser scanner aerotransportado em área de floresta usando o software livre GRASS. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007, Florianópolis. Anais... São José dos Campos: INPE, 2007. p. 3653-3660.
- COOPS, N.; HILKER, T.; WULDER, M.; ST-ONGE, B.; NEWNHAM, G.; SIGGINS, A.; TROFYMOW, J. Estimating canopy structure of Douglas-fir forest stands from discrete-return LiDAR. **Trees - Structure and Function**, v. 21, n. 3, p. 295-310, 2007.
- COSTA, S. M. A.; LIMA, M. A. D. A.; JÚNIOR, N. J. D. M.; ABREU, M. A.; SILVA, A. L. D.; FORTES, L. P. S. RBMC em tempo real, via NTRIP, e seus benefícios nos levantamentos RTK e DGPS. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO, 2. 8-11 set. 2008, Recife. As Ciências geodésicas e tecnologias da geoinformação no contexto de estudos e aplicações em geociências, engenharias e meio ambiente. **Anais**. Recife: Universidade Federal de Pernambuco, 2008.
- 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. DOI: 10.1117/2.1200909.1732. Disponível em: < http://spie.org/documents/Newsroom/Imported/1732/1732_6076_0_2009-09-21.pdf>. Acesso em 15 fev. 2010.
- DANILIN, I.; MEDVEDEV, E. Forest inventory and biomass assessment by the use of airborne laser scanning method (example from Siberia). In: ISPRS WORKING GROUP VIII/2, 2004, Freiburg. **Laser-scanners for forest and landscape assessment: proceedings**. Freiburg: Institute for Forest Growth: Institute for Remote Sensing and Landscape Information Systems: Albert Ludwigs University, 2004. p. 139-144. (International archives of photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences, v. 36, pt. 8/W2). Editado por: M. Thies, B. Koch, H. Spiecker, H. Weinacker. Disponível em: < <http://www.isprs.org/proceedings/XXXVI/8-W2/DANILIN.pdf>>. Acesso em: 10 out. 2009.
- DEAN, T. J.; CAO, Q. V.; ROBERTS, S. D.; EVANS, D. L. Measuring heights to crown base and crown median with LiDAR in a mature, even-aged loblolly pine stand. **Forest Ecology and Management**, v. 257, p. 126-133, 2009.
- DUBAYAH, R.; KNOX, R.; HOFTON, M.; BLAIR, J. B.; DRAKE, J. Land surface characterization using LiDAR remote sensing. In: HILL, M. J. & ASPINALL, R.J. (eds), **Spatial Information for Land Use Management**. Gordon & Breach Science Publishers, Amsterdam. 2000, 25-38 p.
- FALKOWSKI, M. J.; SMITH, A. M. S.; 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.

- FLOOD, M. LiDAR activities and research priorities in the commercial sector. In: ISPRS WORKING GROUP III/3, 2001, Anapolis. **Land surface mapping and characterization using laser altimetry**: proceedings. Freiburg: [S.I.] International Society of Photogrammetry and Remote Sensing, 2001. p. 3-7. (International archives of photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences, v. 34, pt. 3/W4). Editado por: M. A. Hofton. Disponível em: < <http://www.isprs.org/proceedings/XXXIV/3-W4/pdf/Flood.pdf>>. Acesso em: 10 out. 2009.
- GUIERA, A. J. A.; CENTENO, T. M.; DELGADO, M. R.; MÜLLER, M. Segmentação por agrupamentos fuzzy cmeans em imagens LiDAR aplicados na identificação de linhas de transmissão de energia elétrica. **Espaço Energia**, n. 3, 2005. Disponível em: < <http://www.espacoenergia.com.br/edicoes/3/003-04.pdf>>. Acesso em: 08 dez. 2009.
- GUTIERREZ, R.; GIBEAUT, J. C.; SMYTH, R. C.; HEPNER, T. L.; ANDREWS, J. R.; WEED, C.; GUTELIUS, W.; MASTIN, M. Precise airborne LiDAR surveying for coastal research and geohazards applications. In: ISPRS WORKING GROUP III/3, 2001, Anapolis. **Land surface mapping and characterization using laser altimetry**: proceedings. Freiburg: [S.I.] International Society of Photogrammetry and Remote Sensing, 2001. p. 185-192. (International archives of photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences, v. 34, pt. 3/W4). Editado por: M. A. Hofton. Disponível em: < <http://www.isprs.org/proceedings/XXXIV/3-W4/pdf/Gutierrez.pdf>>. Acesso em: 10 out. 2009.
- HIRATA, Y. The effects of footprint size and sampling density in airborne laser scanning to extract individual trees in mountainous terrain. In: ISPRS WORKING GROUP VIII/2, 2004, Freiburg. **Laser-scanners for forest and landscape assessment**: proceedings. Freiburg: Institute for Forest Growth: Institute for Remote Sensing and Landscape Information Systems: Albert Ludwigs University, 2004. p. 283-287. (International archives of photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences, v. 36, pt. 8/W2). Editado por: M. Thies, B. Koch, H. Spiecker, H. Weinacker. Disponível em: < <http://www.isprs.org/proceedings/XXXVI/8-W2/HIRATA.pdf>>. Acesso em: 10 out. 2009.
- 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 of thinning. **Forest Ecology and Management**, v. 258, n. 5, p. 752-760, 2009.
- HOLMGREN, J.; PERSSON, Å. Identifying species of individual trees using airborne laser scanner. **Remote Sensing of Environment**, v. 90, n. 4, p. 415-423, 2004.
- HYYPÄ, J.; HYYPÄ, H.; LITKEY, P.; YU, X.; HAGGRÉN, H.; RÖNNHOLM, P.; PYYSALO, U.; JUHO PITKÄNEN, J.; MALTAMO, M. Algorithms and Methods of Airborne Laser-Scanning for Forest Measurements. In: ISPRS WORKING GROUP VIII/2, 2004, Freiburg. **Laser-scanners for forest and landscape assessment**: proceedings. Freiburg: Institute for Forest Growth: Institute for Remote Sensing and Landscape Information Systems: Albert Ludwigs University, 2004. p. 82-89. (International archives of photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences, v. 36, pt. 8/W2). Editado por: M. Thies, B. Koch, H. Spiecker, H. Weinacker. Disponível em: < <http://www.isprs.org/proceedings/XXXVI/8-W2/HYYPPE.pdf>>. Acesso em: 10 out. 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, n. 1, p. 29-36, Jan. 2010.
- KERSTING, J.; CENTENO, J. A. S.; MACHADO, Á. M. L.; PEDRO, P. D. C. Filtragem de modelos digitais de superfície derivados da varredura a laser usando a triangulação de Delaunay. In: KRUEGER, C. P.; RIBEIRO, S. R. A. (Org.). Série em Ciências Geodésicas. 5 ed. Curitiba: Curso de pós-graduação em Ciências Geodésicas, 2005, v. 5, p. 145-160.
- KIM, S. **Individual tree species identification using LIDAR-derived crown structures and intensity data**. 2007. 137 f. Thesis (Doctor of Philosophy). College of Forest Resources, University of Washington, Washington.
- KIM, S.; MCGAUGHEY, R. J.; ANDERSEN, H.-E.; SCHREUDER, G. Tree species differentiation using intensity data derived from leaf-on and leaf-off airborne laser scanner data. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, n. 8, p. 1575-1586, 2009.
- KOETZ, B.; SUN, G.; MORSDORF, F.; RANSON, K. J.; KNEUBÜHLER, M.; ITTEN, K.; ALLGÖWER, B. Fusion of imaging spectrometer and LIDAR data over combined radiative transfer models for forest canopy characterization. **Remote Sensing of Environment**, v. 106, n. 4, p. 449-459, 2007.
- KRAUS, K.; PFEIFER, N. Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 53, n. 4, p. 193-203, 1998.
- KWAK, D.-A.; LEE, W.-K.; LEE, J.-H.; BIGING, G.; 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.
- LIM, K.; TREITZ, P.; GROOT, A.; ST-ONGE, B. Estimation of individual tree heights using LiDAR remote sensing. In: CANADIAN SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING, 23., 2001, Québec. **Proceedings...** Ottawa: Canadian Aeronautics and Space Institute, 2001. p.243-250.
- LIMA, S. R. S. D. **Integração GPS/INS utilizando sensores inerciais baseados em sistemas microeletromecânicos (MEMS)**. 2005. 136 f. (Doutorado em Ciências) - Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências Exatas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- MACEDO, R. C. **Estimativa volumétrica de povoamento clonal de Eucalyptus sp. através de laserscanner aerotransportado**. 2009. 143 p. (INPE-15743-TDI/1488). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2009. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2009/02.13.04.40>>. Acesso em: 10 mar. 2010.
- MEANS, J. E.; ACKER, S. A.; FITT, B. J.; RENSLOW, M.; EMERSON, L.; HENDRIX, C. Predicting forest stand characteristics with airborne scanning LiDAR. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 66, n. 11, p. 1367-1371, 2000.

- MIQUELES, M. A.; CENTENO, J. A. S. Detecção e caracterização de vegetação usando dados do laser scanner aerotransportado. In: COLÓQUIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS, 3., 2003, Curitiba. Novos desenvolvimentos em ciencias geodésicas: **anais** Curitiba : UFPR/Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, 2003. p. 1-12.
- MOSTAFA, M. M. R.; HUTTON, J. Direct positioning and orientation systems - How do they work ? What is the attainable accuracy ? In: AMERICAN SOCIETY OF PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING ANNUAL CONFERENCE, 2001. St. Louis, Missouri, **Proceedings...**, April 23- 27. 11 p.
- MÖRSDORF, F.; MEIER, E.; KOTZA, B.; ITTENA, K. I.; DOBBERTINC, M.; ALLGOWERB, 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, p. 353-362, 2004.
- MUTLU, M.; POPESCU, S. C.; STRIPLING, C.; SPENCER, T. Mapping surface fuel models using LiDAR and multispectral data fusion for fire behavior. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, p. 274-285, 2008.
- NÆSSET, E. Determination of mean tree height of forest stands using airborne laser scanner data. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 52, n. 2, p. 49-56, 1997.
- NÆSSET, E. Predicting forest stand characteristics with airborne scanning laser using a practical two-stage procedure and field data. **Remote Sensing of Environment**, v. 80, n. 1, p. 88-99, 2002.
- NÆSSET, E.; ØKLAND, T. Estimating tree height and tree crown properties using airborne scanning laser in a boreal nature reserve. **Remote Sensing of Environment**, v. 79, n. 1, p. 105-115, 2002.
- NILSSON, M. Estimation of Tree Heights and Stand Volume Using an Airborne LiDAR System. **Remote Sensing of Environment**, v. 56, p. 1-7, 1996.
- OONO, K.; NUMATA, Y.; HIRANO, A. An improved method of individual tree detection using airborne LiDAR. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIDAR APPLICATIONS IN FOREST ASSESSMENT AND INVENTORY, 8., 2008. Edinburgh. **Proceedings**. Bournemouth: Bournemouth University, 2008. p. 508-516. *SilviLaser 2008*. Disponível em: <http://geography.swan.ac.uk/silvilaser/papers/poster_papers/Oono.pdf>. Acesso em 15 jun. 2009.
- PACKALÉN, P. **Using airborne laser scanning data and digital aerial photographs to estimate growing stock by tree species**. 2009. 41 f. Thesis (Doctor) - Faculty of Forest Sciences, University of Joensuu. (Dissertationes Forestales, 77). Disponível em: <<http://www.metla.fi/dissertationes/df77.htm>>. Acesso em 15 jun. 2009.
- PERSSON, Å.; HOLMGREN, J.; SODERMA, U. Detecting and Measuring Individual Trees Using an Airborne Laser Scanner. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 68, n. 98, p. 925-932, September 2002.
- PITKÄNEN, J.; MALTAMO, M.; HYYPPÄ, J.; WEI YU, X. Adaptive Methods for Individual Tree Detection on Airborne Laser Based Canopy Height Model. In: ISPRS WORKING GROUP VIII/2, 2004, Freiburg. **Laser-scanners for forest and landscape assessment**: proceedings. Freiburg: Institute for Forest Growth: Institute for Remote Sensing and Landscape Information Systems: Albert Ludwigs University, 2004. p. 187-191 (International archives of photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences, v. 36, pt. 8/W2). Editado por: M. Thies, B. Koch, H. Spiecker, H. Weinacker. Disponível em: <<http://www.isprs.org/proceedings/XXXVI/8-W2/PITKAENEN.pdf>>. Acesso em: 10 out. 2009.
- POPESCU, S. C.; WYNNE, R. H. Seeing the trees in the forest: using LiDAR and multispectral data fusion with local filtering and variable window size for estimating tree height. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 70, n. 5, May 2004.
- POPESCU, S. C.; WYNNE, R. H.; SCRIVANI, J. A. Fusion of small-footprint LiDAR and multispectral data to estimate plot-level volume and biomass in deciduous and pine forests in Virginia. **Forest Science**, v. 50, n. 4, p. 551-565, 2004.
- RAMOS, A. M.; LEANDRO, D.; HUINCA, S. M.; KRUEGER, C. P. Análise da acurácia horizontal do posicionamento GPS diferencial empregado em levantamentos hidrográficos a partir de sistemas DGPS. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOMÁTICA, 2; COLÓQUIO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS, 5., 2007, Presidente Prudente, **Anais...** Presidente Prudente, SP: Universidade Estadual Paulista, 2007. v. 1. 9 p.
- RIAÑO, D.; MEIER, E.; ALLGÖWER, B.; CHUVIECO, E.; USTIN, S. L. Modeling airborne laser scanning data for the spatial generation of critical forest parameters in fire behavior modeling. **Remote Sensing of Environment**, v. 86, n. 2, p. 177-186, 2003.
- ROBERTS, S. D.; DEAN, T. J.; EVANS, D. L.; MCCOMBS, J. W.; HARRINGTON, R. L.; GLASS, P. A. Estimating individual tree leaf area in loblolly pine plantations using LiDAR-derived measurements of height and crown dimensions. **Forest Ecology and Management**, v. 213, p. 54-70, 2005.
- SALLEM FILHO, S. As inovações do laser aerotransportado: suas vantagens para mapeamento de dutos. In: RIO PIPELINE CONFERENCE & EXPOSITION, 2007, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: IBP, 2007. Disponível em: <http://www.lidar.com.br/trabalhos/geral/inovacoes_laser_2007.pdf>. Acesso em 15 maio de 2009.
- SCHAWLOW, A. L.; TOWNES, C. H. Infrared and Optical Masers. **Physical Review**, v. 112, n. 6, p. 1940-1949, 1958.
- SIEPMANN, J. P. Fusion of current technologies with real-time 3D MEMS LADAR for novel security and defense applications. In: LASER RADAR TECHNOLOGY AND APPLICATIONS, 11., 2006. **Proceedings...** Orlando: SPIE, 2006. v. 6214. p. 14-18. Editado por: G. W. Kamerman; M. D. Turner
- SILVA, F. A.; RIBAS, W. K. Perfilamento Laser em Áreas Densamente Florestadas. In: RIO PIPELINE CONFERENCE & EXPOSITION, 2007, Rio de Janeiro, **Anais...** Rio de Janeiro: IBP, 2007. (IBP1284_07)

- SITHOLE, G.; VOSSELMAN, G. Comparison of filtering algorithms. In: ISPRS WORKING GROUP III/3, 2003, Dresden. **3-D Reconstruction from airborne laserscanner and insar data international**: proceedings. Dresden. Institute of Photogrammetry and Remote Sensing: Dresden University of Technology, 2003. p. 71-78 (International archives of photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences, v. 34, pt. 3/W13). Editado por: H.-G. Maas, G. Vosselman, A. Streilein. Disponível em: < http://www.isprs.org/commission3/wg3/workshop_laserscanning/papers/Sithole_ALSDD2003.pdf>. Acesso em: 10 out. 2009.
- SMITH, D. E.; ZUBER, M. T.; ABSHIRE, J. B. Mars Observer laser altimeter investigation. In: STATE-OF-THE-ART MAPPING, 1993, Orlando. **Proceedings....** Orlando: SPIE, 1993. v. 1943. p. 14-18. Editado por: D. E. Smith, M. T. Zuber, J. B. Abshire.
- SUÁREZ, J. C.; ONTIVEROS, C.; SMITH, S.; SNAPE, S. Use of airborne LiDAR and aerial photography in the estimation of individual tree heights in forestry. **Computers & Geosciences** n. 31, p. 253-262, 2005.
- TAGUCHI, H.; ENDO, T.; SETOJIMA, M.; YASUOKA, Y. A new method for individual tree detection using airborne LiDAR pulse data. In: ASIAN CONFERENCE ON REMOTE SENSING (ACRS 2006), 27., 2006, Ulaanbaatar, Mongolia. **Proceedings...** Bangkok : Asian Association of Remote Sensing (AARS). 7 p.
- TIEDE, D.; HOCHLEITNER, G.; BLASCHKE, T. A full GIS-based workflow for tree identification and tree crown delineation using laser scanning. In: ISPRS CMRT 2005, Vienna. **Object Extraction for 3D City Models, Road Databases and Traffic Monitoring - Concepts, Algorithms and Evaluation**: proceedings. Vienna, Austria: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2005. p 9-14. (International archives of photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences, v. 36, pt. 3/W24). Editado por: U.Stilla, F.Rottensteiner, S.Hinz. Disponível em: < http://www.isprs.org/proceedings/XXXVI/3-W24/papers/CMRT05_Tiede_et_al.pdf>. Acesso em: 10 out. 2009.
- TURNER, R. An overview of Airborne LiDAR applications in New South Wales state forests. In: ANZIF CONFERENCE. New South Wales. **Growing Forests Values**: proceedings. Coffs Harbour, NSW, Australia, 2007. 1 CD-ROM.
- WAGNER, W.; ULLRICH, A.; DUCIC, V.; MELZER, T.; STUDNICKA, N. Gaussian decomposition and calibration of a novel small-footprint full-waveform digitising airborne laser scanner. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 60, n. 2, p. 100-112, 2006.
- WAGNER, W.; ULLRICH, A.; MELZER, T.; BRIESE, C.; KRAUS, K. From single-pulse to fullwaveform airborne laser scanners: potential and practical challenges. In: ISPRS Congress, 20., 2004, Istanbul, Turkey. **Geo-Imagery Bridging Continents**: proceedings...Istanbul, 2004. p. 201-206. (International archives of photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences, v. 35, pt. B3). Comission 3. Disponível em: < <http://www.isprs.org/proceedings/XXXV/congress/comm3/papers/267.pdf>>. Acesso em: 10 out. 2009.
- WEHR, A.; LOHR, U. Airborne laser scanning-an introduction and overview. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 54, n. 2-3, p. 68-82, 1999.
- 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, n. 1, p. 42-46, Feb. 2010.
- YU, X.; HYYPPÄ, J.; KAARTINEN, H.; MALTAMO, M. Automatic detection of harvested trees and determination of forest growth using airborne laser scanning. **Remote Sensing of Environment**, v. 90, n. 4, p. 451-462, 2004.
- ZANDONÁ, D. F.; LINGNAU, C.; NAKAJIMA, N. Y. Varredura a laser aerotransportado para estimativa de variáveis dendrométricas. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 36, n. 80, p. 295-306, 2008.

Recebido em 22 de julho de 2010 e aprovado em 16 de novembro de 2010