

CONTRIBUTO DOS DADOS LiDAR PARA O INVENTÁRIO FLORESTAL MUNICIPAL

Carlos Alexandre Miguel Sarmiento

**Relatório de Estágio de Mestrado em Gestão do Território
Especialização em Detecção Remota e SIG**

MARÇO 2010



Relatório de Estágio apresentado para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Gestão do Território, realizado sob a orientação científica do Professor Doutor José António Tenedório e Dr. Nelson Mileu.

DECLARAÇÕES

Declaro que este Relatório é o resultado da minha investigação pessoal e independente. O seu conteúdo é original e todas as fontes consultadas estão devidamente mencionadas no texto, nas notas e na bibliografia.

O candidato,

Lisboa, 30 de Março de 2010

Declaro que este Relatório se encontra em condições de ser apresentada a provas públicas.

Os orientadores,

José António Tenedório

Nelson Mileu

Lisboa, 30 de Março de 2010

AGRADECIMENTOS

À Municípia Lda., nomeadamente ao meu orientador, Nelson Mileu, pela oportunidade e cedência dos dados.

À FCSH e ao e-GEO, nomeadamente a Teresa Santos, pelo apoio logístico necessário à execução deste estágio, e pelo interesse que sempre demonstraram.

Ao Grupo de Detecção Remota do Instituto Geográfico Português, por ter sido para mim uma escola durante dois anos, tanto a nível profissional como pessoal.

Ao meu orientador, José António Tenedório, pela confiança e respeito, e pela incansável paciência e compreensão.

Aos meus avós, por acreditarem sempre, e por serem um dos meus modelos de humildade, força e dedicação.

Aos meus pais e irmão, pelo apoio incondicional, por tudo.

Ao Romeu, pelos 15 anos de Amizade, nos bons e maus momentos. Adeus Amigo.

RESUMO

RELATÓRIO DE ESTÁGIO – CONTRIBUTO DOS DADOS LIDAR PARA O INVENTÁRIO FLORESTAL MUNICIPAL

CARLOS ALEXANDRE MIGUEL SARMENTO

PALAVRAS-CHAVE: LiDAR, Extração, Modelo Digital de Terreno, Altura das Árvores, Exactidão Vertical, Inventário Florestal, SIG, Detecção Remota, Gestão Florestal, Municípios.

Resumo: A gestão florestal tem vindo a adquirir um papel cada vez mais relevante em Portugal, tendo sido criados, nos últimos anos, mecanismos de monitorização mais assíduos e precisos. As autarquias têm assumido grande parte das responsabilidades de gestão dos espaços florestais do município quanto à defesa contra os incêndios, entre outros. No entanto, a medição de variáveis dendrométricas em campo tem custos elevados, sendo que as precisões não servem muitas vezes os propósitos de inventariação de grandes áreas. Em alternativa, existem novas tecnologias que permitem aumentar a precisão e qualidade das ferramentas de gestão actuais. É o caso da tecnologia LiDAR, um sensor de varrimento laser aerotransportado que mapeia o coberto com precisões elevadas, reduzindo custos e tempos de processamento. Nesse sentido, o estágio na Município, empresa que adquiriu recentemente um sensor LiDAR, teve como objectivo equacionar as aplicações ao sector florestal, tanto no que toca ao inventário (altura da árvore), como à detecção e reconhecimento de árvores para efeitos de mapeamento do coberto de solo. De modo a conhecer a precisão dos dados LiDAR, a análise teve como objectivo avaliar a exactidão vertical da altura extraída através do processamento dos dados. Foi delineada uma área de experimentação com três parcelas distintas, segundo o declive e a densidade de coberto florestal (Zona Residencial Urbana com árvores espaçadas dispostas em alinhamento, Parque de Estacionamento com faixas de árvores e Floresta). Após a medição de cerca de 200 alturas em campo, para efeitos de validação, compararam-se as diferentes correlações obtidas em cada parcela. Verificou-se que a Parcela Florestal tinha obtido os piores resultados. Neste sentido, foram criadas sub-parcelas na Parcela Florestal, de modo a que cada uma representasse uma combinação entre declive (baixo ou elevado), e densidade de coberto florestal (baixa ou elevada), perfazendo um total de quatro classes de ocupação do solo. Concluiu-se que uma densidade alta influencia negativamente a exactidão dos dados LiDAR. Assim, retiraram-se da equação alguns pontos considerados como erros ou desvios, obtendo-se deste modo uma correlação de 0,88. Sendo a altura da árvore uma das variáveis mais importantes na avaliação de uma floresta, ficou demonstrada a importância desta nova tecnologia na complementação de ferramentas de gestão e avaliação actuais. De facto, esta correlação demonstra o potencial desta técnica de mapeamento florestal, sendo inúmeras as aplicações no que toca à protecção contra incêndios (avaliação do volume de biomassa, detecção de áreas de intervenção prioritária), à produção florestal (inventário florestal, avaliação do volume de madeira), e à conservação (manutenção de espaços lúdicos, reservas naturais e florestas de recreio). Apesar destas aplicações directas terem todas grande importância, é no inventário florestal que recai a maior vantagem desta tecnologia. Este processo envolve custos elevados para precisões dúbias, pelo que o LiDAR vem incutir uma alternativa à quantificação de variáveis dendrométricas, facilitando a gestão e monitorização dos espaços florestais por parte das autarquias e privados, e permitindo uma optimização da gestão florestal a nível nacional, municipal e privado.

ABSTRACT

CONTRIBUTION OF LIDAR DATA FOR MUNICIPAL FOREST INVENTORY

CARLOS ALEXANDRE MIGUEL SARMENTO

KEYWORDS: LiDAR, Extraction, Digital Terrain Model, Tree Height, Vertical Accuracy, Forest Inventory, GIS, Remote Sensing, Forest Management, Municipalities.

Abstract: Forest management is acquiring an increasingly more important role in Portugal. Municipalities have been gaining responsibility for the management of forest areas, like protection against forest fires. However, the measurement of dendrometric variables in the field is expensive, and often its accuracy doesn't serve the purposes of inventorying large areas. Alternatively, there are new technologies that can increase the accuracy and the quality of those management tools, like the LiDAR technology, that consists on an airborne laser scanner which maps the heights of the ground surface with high precision, reducing costs and processing times. Thus, the stage at Município, that recently acquired a LiDAR sensor, aimed to consider its applications in the forestry area, such as forest inventory (tree height measurement) or the detection and recognition of trees for mapping purposes. The analysis was made in order to assess the accuracy of the vertical height of LiDAR extracted data. An area of experimentation was outlined with three distinct plots, according to the slope and density of forest cover (Urban Residential area with trees arranged in alignment, Parking lot with trees, and an exclusive forest area). After the measurement of almost 200 tree heights for validation purposes, the different correlations were calculated in each plot. The plot Forest obtained the worst results. Then, sub-plots in the forest plot were identified, so that each one represented a combination of slope (low or high), and density of forest canopy (low or high). The analysis concluded that a high density negatively influences the accuracy of the LiDAR data. In order to find out the real accuracy, with no outliers, of the LiDAR data, as some points are considered errors, some points were withdrawn from the analysis, resulting in a correlation of 0.88. Thus, as the height of a tree is one of the most important variables in the evaluation of a forest, the importance of this new technology is to complement the management tools and evaluation techniques. In fact, this analysis showed the potential of LiDAR data in forest mapping, and many other applications, like forest fire protection (assessment of the volume of biomass, pointing out areas of priority intervention), forest production (assessment of timber volume) and the conservation (maintenance of playground areas, nature reserves and forest recreation). Despite the importance of all this advantages, the biggest advantage of this technology is in forest inventory accuracy. This process involves high costs for dubious accuracies. LiDAR represents an alternative to the quantification of dendrometrical variables, which eases the management and monitoring of forest areas by local authorities and private owners, allowing an optimization of forest management at national, municipal and private levels.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1 – CONTEXTO TÉCNICO DA EXPLORAÇÃO DE DADOS LiDAR PARA INVENTÁRIO

FLORESTAL.....	9
1.1. Gestão Florestal Sustentável	9
1.2. Inventário Florestal	12
1.3. Tecnologia LiDAR	13
1.3.1. Sensor LiDAR.....	13
1.3.2. Reflexões múltiplas.....	15
1.3.3. Recolha de dados.....	15
1.3.4. Primeiro e último retorno	15
1.3.5. Nuvem de pontos.....	16
1.3.6. Modelo Digital de Terreno	16
1.3.7. Aplicações	18
1.4. Detecção Remota e Sistemas de Informação Geográfica	18
1.4.1. Detecção Remota	18
1.4.2. Sistemas de Informação Geográfica.....	19
1.4.3. Integração de ferramentas	20
CAPÍTULO 2 – CONTEXTO ORGANIZACIONAL, OBJECTIVOS E ÁREA DE EXPERIMENTAÇÃO PARA	
EXTRACÇÃO DE INFORMAÇÃO A PARTIR DE DADOS LiDAR	21
2.1. Enquadramento Organizacional	Error! Bookmark not defined.
2.2. Objectivos	21
2.3. Área de estudo.....	22
2.3.1. Caracterização física	22
2.3.2. Caracterização climática	23
2.3.3. Vegetação potencial e coberto existente.....	24
CAPÍTULO 3 – MATERIAL E MÉTODOS PARA EXTRACÇÃO DE INFORMAÇÃO A PARTIR DE DADOS	
LiDAR.....	26
3.1. Material	26
3.1.1. Dados LiDAR.....	26
3.1.2. Fotografia aérea.....	26

3.1.3.	Programas de tratamento de informação geográfica	27
3.1.4.	Programa de tratamento de dados LiDAR (extração)	27
3.1.5.	Programa de tratamento de dados	28
3.1.6.	Instrumentos para inventário florestal.....	28
3.2.	Métodos.....	31
3.2.1.	Cartografia e Foto-interpretação da área de estudo.....	31
3.2.2.	Extração de informação.....	34
3.2.3.	Medição e Estimação de variáveis dendrométricas em campo	39
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS		42
4.1.	Resultados e discussão	42
4.1.1.	Extração de informação a partir de dados LiDAR	42
4.1.2.	Análise dos resultados.....	44
4.1.3.	Considerações finais.....	52

CAPÍTULO 1 – CONTEXTO TÉCNICO DA EXPLORAÇÃO DE DADOS LiDAR PARA INVENTÁRIO FLORESTAL

1.1. Gestão Florestal Sustentável

A primeira década do século XXI foi marcada, entre outros problemas, pelo flagelo dos incêndios florestais, alarmando as autoridades responsáveis para a necessidade de implementação de novas filosofias e metodologias de gestão dos espaços florestais. A mediatização deste problema também trouxe mais visibilidade ao sector, garantindo-lhe um lugar de destaque na hierarquia das prioridades nacionais. De facto, os espaços florestais ocupam 64% do território nacional, representando 3.2% do PIB Nacional, 12% do PIB Industrial, 11% das exportações e abrange 260 mil postos de trabalho (Estatísticas agrícolas, INE, 2007). Deste modo, as florestas representam um alvo de gestão primordial e prioritário, tanto no que toca à preservação e conservação destes espaços, como à garantia da sua sustentabilidade e exploração a longo prazo das funções lúdicas, de produção e de gestão dos recursos naturais.

Segundo Tomé (2007), o conceito de gestão florestal inclui a produção sustentada de madeira, a manutenção da estabilidade do ecossistema florestal e a satisfação das exigências de uma sociedade em permanente evolução. De facto, o uso da floresta, no seu sentido lato, passa pela obtenção dos mais diversos produtos e serviços: produtos lenhosos (madeira ou cortiça) e não lenhosos (cogumelos ou frutos de casca dura), recreio e lazer (parques naturais ou florestas urbanas), actividade cinegética, apicultura, entre outros. Deste modo, as intervenções realizadas nos espaços florestais devem ser compatíveis com a manutenção da sua biodiversidade, produtividade, capacidade de regeneração e vitalidade, de modo a garantir que as gerações futuras venham a ter igual oportunidade de a utilizar. Este conceito de interacção consciente entre o Homem e a floresta é conhecido por gestão florestal sustentável. Para além do referido a floresta tem um papel determinante na protecção dos solos e regula o funcionamento do escoamento superficial, aspecto particularmente importante em situações de ocorrência de fenómenos climáticos extremos.

Os diversos tipos de gestores de recursos florestais (gestores e proprietários florestais, entidades públicas e privadas) necessitam de dados fiáveis nos quais possam basear as suas opções de gestão e que lhes permitam avaliar, as consequências das decisões tomadas no passado. Os programas de inventariação e monitorização de recursos florestais fornecem esta informação, embora tenham as suas limitações. O inventário de recursos florestais é uma etapa incontornável na caracterização de uma área florestal, enquanto a monitorização de recursos florestais tem como objectivo a avaliação das alterações dos recursos, tentando avaliar as causas das mudanças observadas, assim como verificar se os planos de gestão florestal estão a decorrer de acordo com o previsto (Tomé, 2007).

Neste contexto, foram desenvolvidas ferramentas políticas de monitorização e conservação a vários níveis, como por exemplo a realização plurianual do Inventário Florestal Nacional, a Carta de Risco de Incêndio a nível nacional, a elaboração de documentos orientadores como os Planos de Ordenamento Florestal (a nível Nacional e Regional), os Planos Municipais de Defesa da Floresta Contra Incêndios (PMDFCI), ou mesmo os Planos Directores Municipais, que envolvem estratégias de planeamento de ocupação do solo.

Por outro lado, o abandono da agricultura que se tem vindo a verificar nas últimas décadas levanta vários problemas a nível da conservação destes espaços: diversas áreas que antes seriam cultivadas e geridas pelos proprietários estão ao abandono e ocupadas por vegetação rasteira, nomeadamente herbáceas e matos. Este desordenamento cria um contínuo de combustível florestal que constitui um sério risco para as populações locais em caso de incêndio. Neste contexto, observou-se nos últimos anos o apoio à implementação de novas metodologias de gestão global, como as Zonas de Intervenção Florestal: criadas com o objectivo de gestão florestal a nível local (com uma área mínima de mil hectares), exigem um acompanhamento mais regular da evolução do coberto, de modo a permitir uma gestão contínua e sustentável dos espaços florestais.

Assim, estes instrumentos de planeamento têm especial relevância, não só a nível nacional e local como a nível municipal, visto o papel das autarquias na gestão do território ser cada vez mais importante. De facto, são elas as principais responsáveis pela elaboração de documentos orientadores como o PMDFCI e o PDM, além de assumirem a gestão dos espaços

florestais do município. Cada município integra também um gabinete florestal, cuja missão é, entre outros, coordenar as Comissões Municipais de Defesa da Floresta contra os Incêndios e desenvolver a Carta de Risco de Incêndio Municipal.

Neste contexto, com a consolidação das já referidas orientações políticas, houve uma necessidade crescente em aumentar a periodicidade da monitorização dos espaços florestais. Porém, os elevados custos envolvidos não permitem a deslocação constante ao terreno e a realização de um inventário florestal com maior frequência, facto que constitui um entrave à gestão optimizada destas áreas. O Inventário Florestal Nacional (ver Anexo I) veio garantir a monitorização esporádica dos espaços florestais. Consiste num serviço de informação, de natureza pública, da responsabilidade da Autoridade Florestal Nacional, que tem como missão avaliar e monitorizar a extensão e estado dos recursos florestais do país. Toda a informação do IFN é produzida a partir de dados originais, recolhidos de acordo com metodologias definidas *a priori*. A recolha de dados é baseada em fotografia aérea e levantamentos de campo. No âmbito do IFN, é ainda produzida a cartografia das áreas florestais a escalas nacionais e regionais. Contudo, a sua precisão à escala municipal não atinge o rigor necessário para fins operacionais.

O Inventário Florestal Nacional é realizado com uma periodicidade de aproximadamente 10 anos, sendo que envolve custos muito elevados, quer pela sua dimensão nacional, quer pela sua precisão (é feito por extrapolação de amostras ao território envolvente). Deste modo, apesar desta iniciativa servir perfeitamente os propósitos a nível nacional, não são satisfeitas as necessidades de monitorização mais assídua do coberto florestal: este carece de uma monitorização mais frequente e precisa, de modo a cumprir as directivas de protecção e conservação do património florestal a nível local.

Como foi discutido, existe uma necessidade real de monitorização da evolução do coberto florestal, com vista a atingir um planeamento eficaz da gestão das florestas, tanto no que toca ao apoio ao cumprimento das linhas orientadoras de gestão, como no apoio à intervenção sistemática e optimizada do coberto florestal. Neste contexto, as ferramentas de apoio à gestão devem evoluir no sentido de uma maior precisão e fiabilidade dos dados. Algumas tecnologias têm vindo a afirmar-se como métodos eficazes na monitorização e no

acompanhamento da evolução do coberto de solo, apesar de existirem ainda alguns entraves à sua utilização na gestão do património florestal. É o caso do inventário florestal e da tecnologia LiDAR, que quando incorporados em sistemas de informação geográfica permitem uma gestão do território cuidada e direccionada para a optimização da gestão florestal com minimização dos custos.

1.2. Inventário Florestal

Existem vários tipos de inventário, segundo a escala e o objectivo com que é realizado. As características do inventário variam consoante o tipo de utilizador, desde proprietários privados (gestão da produção de madeira ou frutos de casca rija) a administradores públicos e políticos (orientações e medidas de política florestal, previsão de combate a fogos florestais, entre outros). Pode assim definir-se inventário florestal como o conjunto de procedimentos que permitem caracterizar uma determinada área florestal, tendo em vista um determinado objectivo (Tomé, 2007).

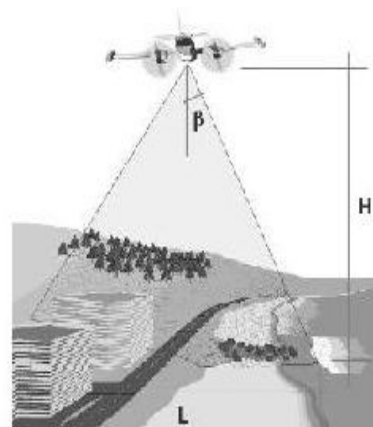
Devido ao facto de não ser possível medir toda a extensão de florestas em Portugal, é utilizada, na maior parte dos casos, a metodologia de amostragem, que consiste em medir pequenas parcelas representativas do estrato arbóreo, e de seguida extrapolar esses valores para a totalidade da área.

As técnicas tradicionais de inventário florestal exigem tempo e recursos que nalguns casos são inviáveis pelas dificuldades de acesso e custos envolvidos, não permitindo deste modo um levantamento exaustivo de todos os parâmetros de um povoamento, o que reduz a precisão do estudo. Por outro lado, como será abordado ao longo do relatório, começam a surgir alternativas a este trabalho moroso e custoso. Trabalhos já desenvolvidos e publicados indicam que é possível a extracção de variáveis dendrométricas a partir de um sensor de varrimento *laser* que regista uma nuvem de pontos de grande densidade, permitindo extrair dados precisos e medidas dendrométricas sem deslocação ao terreno. Esta tecnologia recente permite assim um aumento da precisão das estimativas indirectas de volume e biomassa florestal. Nilsson (1996), Friedlaender, Koch (2000) e Pires, ao comparar a altura estimada à altura medida através deste sensor, observaram que a correlação entre as duas variáveis é

geralmente na ordem dos 0.9.

1.3. Tecnologia LiDAR

A tecnologia LiDAR permite fazer o levantamento da altimetria através de varrimento *laser* (Cf. Figura 1). É usada na aquisição de dados topográficos a grandes escalas, afirmando-se cada vez mais como uma técnica incontornável na recolha de informação geográfica, capaz de atingir precisões muito elevadas segundo a altura do voo. Do ponto de vista do utilizador, esta tecnologia fornece, relativamente às técnicas tradicionais, tempos de aquisição mais curtos, precisão e densidade de pontos relativamente mais elevadas, entre outros. De modo a explicar de uma forma mais completa a extracção de informação a partir dos dados LiDAR, far-se-á uma abordagem mais pormenorizada a esta tecnologia.

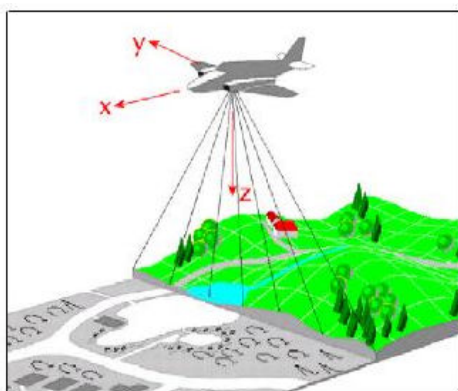


Fonte: BRANDALIZE (2002).

Figura 1: Varrimento laser do sensor LiDAR

1.3.1. Sensor LiDAR

LiDAR é um acrónimo para *Light Detection And Ranging*. Esta tecnologia recente, que detecta variações na elevação do terreno, é utilizada na determinação da forma da superfície do terreno, tanto no que toca à vegetação natural como às infra-estruturas nela presentes. O LiDAR é amplamente utilizado no mapeamento de objectos elevados, como árvores e edifícios.



Fonte: KATZENBEISSER (2004)

Figura 2: Varrimento laser do sensor LiDAR

Um sistema LiDAR aerotransportado genérico é composto por um scanner laser, um sistema de posicionamento e orientação e uma unidade de controlo (computador e suporte de armazenamento digital). Actualmente,

alguns sistemas LiDAR incorporam já outros sensores tais como câmaras digitais multi-espectrais. Um conjunto típico de dados LiDAR consiste numa nuvem irregular de pontos (ver Anexo II), onde a cada ponto são atribuídas coordenadas x , y e z (Cf. Figura 2), um ID único (marca temporal), e a intensidade I do sinal recebido. A intensidade da luz reflectida depende das características do terreno, do comprimento de onda da luz laser e do ângulo de incidência.

Deste modo, aquando da incidência dos feixes laser em objectos sólidos, aqueles são reflectidos de volta para o sensor, permitindo calcular a altura do objecto em questão (através do tempo decorrido entre a emissão e a recepção do feixe). Como foi descrito acima, um sistema LiDAR baseia-se em três componentes na determinação das alturas:

- Tempo do pulso: o laser transmite um pulso que é reflectido a partir de um objecto, incidindo novamente no receptor. O sensor capta o tempo de retorno de milhares de pulsos laser por segundo.
- Coordenadas do pulso: um GPS em modo diferencial permite georeferenciar os pontos laser e registar a respectiva altitude em relação à superfície do terreno. Um dos aparelhos GPS encontra-se no avião, outro no chão.
- Altitude do avião: um Sistema de Navegação Inerte (SNI) é utilizado, para saber a altitude do voo.

Através desta informação (tempo de pulso, coordenadas do pulso e altitude do avião), é possível calcular a altura dos objectos presentes na superfície do terreno:

- O tempo de retorno (T) do pulso é registado e multiplicado pela velocidade do pulso, que corresponde à velocidade da luz.
- O resultado do anterior é dividido por dois (visto o feixe ter um tempo de ida e outro de volta):

$$\text{Distância percorrida pelo feixe } (d) = \frac{\text{Tempo de retorno } (T) \times \text{Velocidade da Luz}}{2}$$

- A distância d é usada para obter a elevação do objecto (e) através da sua subtracção à

altitude do avião:

$$\text{Elevação do objecto } (e) = \text{Altitude do avião } (a) - \text{Distância percorrida pelo feixe}$$

- Finalmente, a altitude do pulso na superfície do terreno (z) é subtraída da elevação do objecto (e), de modo a obter uma maior precisão.

$$\text{Elevação corrigida do objecto } (e^*) = \text{Elevação do objecto } (e) - \text{Altitude do pulso } (z)$$

1.3.2. Reflexões múltiplas

Os pulsos *laser* podem ter várias reflexões a partir de um único feixe, permitindo uma modelação detalhada da superfície do terreno. Parte do feixe incide num objecto sólido e regressa ao sensor, enquanto o resto continua até ao solo. As reflexões múltiplas podem determinar superfícies intermédias como o coberto florestal, permitindo obter a elevação não só do terreno mas também de outros objectos. Deste modo, é gerado um modelo de elevação do terreno mais pormenorizado.

1.3.3. Recolha de dados

Como foi referido, os dados LiDAR são registados através de um sensor de varrimento *laser*. A largura do varrimento e a sobreposição entre linhas de voo paralelas varia. Cada feixe registado gera um ponto com coordenadas x , y e z , respectivamente longitude, latitude e elevação.

1.3.4. Primeiro e último retorno

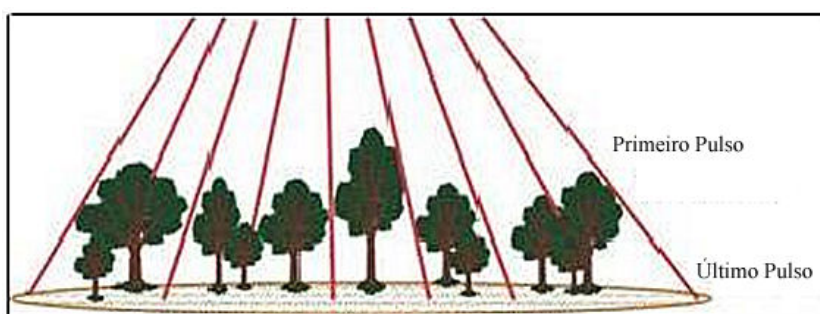


Figura 3: Primeiro e último pulso (ou retorno)

Cada feixe de luz transmitido pode resultar numa ou várias reflexões (até um máximo de cinco). A reflexão ou retorno é definida como a porção de

luz que incide na superfície e volta ao sensor.

Em áreas contendo superfícies mais pequenas do que o raio do feixe, podem ocorrer reflexões múltiplas. Quando o feixe entra em contacto com um objecto de tal modo que só parte da energia incidente é reflectida de volta para o sensor, a energia restante continua o seu trajecto até encontrar um objecto sólido. Aí, é reflectida de volta para o sensor. A primeira porção de luz a ser reflectida é denominada de *primeiro pulso*. A porção restante de luz que chega ao sensor depois de ter incidido sobre o objecto final é denominada *último pulso* (Cf. Figura 3).

O primeiro pulso ou retorno corresponde à altura dos objectos mais altos, e o último retorno à altura dos objectos mais próximos da superfície, ou mesmo da própria superfície. Deste modo, é possível utilizar os dois retornos para extrair edifícios, árvores e a elevação do solo nu. Os retornos intermédios, que incidem muitas vezes em objectos como ramos de árvores, são úteis no estudo da estrutura do coberto florestal.

1.3.5. Nuvem de pontos

O conjunto dos dados LiDAR, originado pelo registo da informação dos diferentes pulsos, é denominado *nuvem de pontos* (ver Anexo II). A densidade desta nuvem de pontos é especificada *a priori* consoante o objectivo do voo. Também, é possível armazenar outro tipo de informação como a informação do retorno, intensidade, tempo e altitude do voo. Estes dados podem ser armazenados em vários formatos, desde ASCII (texto, CSV, entre outros) até dados binários (bin, LAS, entre outros).

1.3.6. Modelo Digital de Terreno

Um modelo digital de elevação de terreno (MDT) é um ficheiro em formato digital contendo o valor da elevação daquele, a intervalos e com espaçamentos regulares, permitindo a representação da topografia do terreno. Não representa os objectos, apenas as variações da altimetria do solo nu.

Deste modo, os dados originais, representados por uma nuvem de pontos com

espaçamento irregular, são convertidos numa quadrícula regular em que a cada pixel se encontra associado o valor da elevação. Dependendo do número de retornos dos dados LiDAR, podem ser criados dois tipos de MDT:

- Um MDT gerado a partir de dados de retorno único;
- Um conjunto de vários MDT gerados a partir de dados de retorno múltiplo

Os dados LiDAR de retorno múltiplo são geralmente convertidos em dados de primeiro retorno, sendo que estes contêm os dados de retorno único e de último retorno. O modelo passa assim a conter informação relativa à elevação do terreno, da vegetação, do coberto florestal e edifícios ou outras estruturas. Por outro lado, é ainda possível remover todos os objectos do MDT, como por exemplo edifícios, carros, arbustos e florestas, de modo a gerar o modelo de terreno, que o solo nu, sem qualquer outro objecto representado.

Nesta fase, é essencial contextualizar a tecnologia LiDAR no âmbito da gestão florestal. Apesar da variável *altura* não ser a única variável dendrométrica a ser medida, é sobre esta que incide esta análise. A altura constitui uma das características mais importantes da árvore, podendo ser medida ou estimada. Devido ao facto de ter uma alta correlação com o volume (Pires, 2005), é de extrema importância que a sua medição ou estimação seja o mais exacta possível. É nela que se baseia o cálculo do volume da biomassa, representando assim uma variável de grande relevo nas estimativas de crescimento e planos de gestão. Assim, segundo Pires (2005), é na medição da estrutura vertical das florestas que reside a principal vantagem da tecnologia LiDAR. De facto, segundo Dubayah e Drake (2001), a medição directa da altura do coberto, topografia do sub-coberto e distribuição vertical das superfícies interceptadas fornecem dados imprescindíveis para a caracterização e gestão dos espaços florestais. Friedlaender e Kich (2000) estudaram um povoamento com 29 árvores, comparando dados extraídos pelo sensor LiDAR com dados medidos em campo, tendo sido observado que o LiDAR sobrestima as alturas em cerca de um metro em média, com uma amplitude de erro de 6 metros. Neste contexto, Huising e Gomes Pereira (1998) sugerem que as características do terreno podem influenciar a exactidão vertical, sendo que um declive alto e/ou uma densidade do coberto elevada aumentam o erro da estimação. Neste sentido, como será abordado mais à frente, estas duas últimas características serão alvo de estudo no que

toca à exactidão dos dados LiDAR. Segundo Hyypä *et al.* (2001), os sistemas LiDAR dispostos em aeronaves têm produzido melhores resultados do que aqueles obtidos através de fotografias aéreas ou sensores espectrais aerotransportados.

1.3.7. Aplicações

O carácter recente da tecnologia LiDAR reflecte-se no facto das suas aplicações ao sector florestal ainda não ser muito divulgadas. No entanto, o potencial deste tipo de dados traduz-se em várias aplicações directas, através do mapeamento florestal de parâmetros como a altura, o diâmetro do tronco ou o comprimento da copa. Ao medir variáveis ao nível da árvore, permite estimar a quantidade de biomassa presente na área, o que por sua vez facilita a classificação de áreas florestais segundo a sua capacidade produtiva e necessidade de intervenção. De facto, Gonçalves e Gonçalves-Seco (2006) estudaram o potencial dos dados obtidos com LiDAR na classificação supervisionada de objectos situados em zonas rurais, concluindo que é possível adicionar à classificação tradicional da nuvem de pontos um número maior de classes representativas destas zonas, melhorando a caracterização do coberto de solo e grau de certeza destes mapas. Turner (2008) enumerou as principais aplicações dos dados LiDAR à gestão florestal: mapeamento topográfico, inventariação do volume de madeira de um povoamento, quantificação de biomassa e carbono acumulado, planeamento de tipo e período de corte, monitorização do estado da saúde de uma floresta, entre outros.

1.4. Detecção Remota e Sistemas de Informação Geográfica

1.4.1. Detecção Remota

A detecção remota baseia-se no registo de informação relativa a objectos através de um sensor sem contacto físico com aqueles. No caso das imagens aéreas, tal como com as imagens orbitais, é possível combinar as diferentes bandas espectrais, de



Figura 4: A combinação de bandas permite realçar a floresta

modo a realçar determinados aspectos do coberto de solo (Cf. Figura 4). Esta técnica tem vindo a afirmar-se como uma solução eficaz no acompanhamento da evolução do coberto de solo. Através da análise e classificação da ocupação de solo, tem-se produzido informação geográfica de grande pertinência para o ordenamento do território, nomeadamente a *Carta de Ocupação do Solo de Portugal* (unidade cartográfica de 1 hectare) e a *Carta Corine Land Cover* (unidade cartográfica de 25 hectares).

No que toca à aplicação da detecção remota na gestão florestal, a extracção de informação de uma imagem aérea permite analisar o coberto florestal e a sua evolução: (i) o crescimento urbano pode ser monitorizado através da análise de uma área urbana em dois ou mais espaços no tempo, e (ii) a desflorestação pode ser medida através da classificação e posterior quantificação, para anos diferentes, da floresta adulta, de novas plantações, cortes e fogos florestais, permitindo assim monitorizar o crescimento florestal num dado espaço temporal. No entanto, esta metodologia baseia-se na análise espectral, sendo difícil e pouco precisa a estimação de biomassa baseada apenas na análise do coberto através de imagens satélite ou aéreas.

1.4.2. Sistemas de Informação Geográfica

Segundo Tomlin, um sistema de informação geográfica (SIG) é um sistema composto por hardware, software e procedimentos organizado de forma a possibilitar a aquisição, gestão, manipulação, análise e visualização de dados que tenham uma componente espacial. Os SIG, ao cruzarem bases de dados alfanuméricas com informação espacial, permitem consultar a tabela de atributos associada a cada objecto. Deste modo é possível extrair informação e analisar o território consoante o objectivo da análise. Um SIG tem assim como objectivo a modelação da realidade, através da sobreposição de várias camadas de informação num sistema dinâmico com funções de apoio à decisão. Assim, o trabalho é organizado em ambiente SIG, que permite construir um projecto num sistema de referência comum. No entanto, a qualidade e funcionalidade deste sistema depende directamente da fiabilidade e precisão dos dados inseridos no sistema.

1.4.3. Integração de ferramentas

Todas estas ferramentas apresentam, por si só, alguns entraves à sua utilização exclusiva: a detecção remota baseia-se em dados de campo, de modo a associar valores espectrais a valores reais e gerar mapas de ocupação de solo fiáveis; a funcionalidade de um SIG depende directamente da qualidade dos dados nele inseridos, pelo que o ponto de partida de uma modelação fidedigna é a aquisição de informação a mais precisa possível; o sensor LiDAR mapeia a altimetria, detecta a altura de objectos presentes no solo mas não fornece dados visuais. No entanto, se estes três componentes forem integrados num sistema de informação geográfica, onde se dispõem as camadas de informação LiDAR e imagens satélite ou aéreas, é possível não só calcular o volume individual da árvore, como também visualizar a sua distribuição espacial em todo o povoamento, ou até mesmo distinguir espécies de árvores segundo as características da sua copa. Estes dados poderão ser utilizados em modelos de quantificação directa ou previsão da evolução do coberto, além de fornecer parâmetros para avaliações sobre o crescimento da vegetação, mapeamento de áreas florestais e intervenções para o aumento da biodiversidade, conservação ou produção florestal. Considera-se que a avaliação da altura do coberto é o ponto de partida para o cumprimento destes objectivos.

CAPÍTULO 2 – CONTEXTO ORGANIZACIONAL, OBJECTIVOS E ÁREA DE EXPERIMENTAÇÃO PARA EXTRACÇÃO DE INFORMAÇÃO A PARTIR DE DADOS LiDAR

2.1. Enquadramento Organizacional

A empresa Municípiã Lda. é uma Sociedade Anónima que opera nas áreas da Fotografia Aérea, Cadastro, Cartografia, Formação, Consultoria, SIG e Desenvolvimento de Aplicações. Desenvolve projectos essencialmente no território Continental, Ilhas e no mercado Africano. Dispõe de duas aeronaves, capazes de produzir Fotografia Aérea Digital e Analógica, e com capacidade para operar tecnologia LiDAR. Foi fundada em 1999, e está sediada no TagusPark, Oeiras, Portugal.

2.2. Objectivos

Tendo em conta a estreita relação entre os municípios e a gestão florestal, o estágio na empresa Municípiã Lda. teve como objectivo geral estudar a aplicação da tecnologia LiDAR ao sector florestal. Como objectivo específico, este relatório pretende analisar o comportamento do sensor em diferentes ambientes e em diferentes níveis de precisão, de modo a analisar a potencialidade das suas aplicações à escala local, municipal e nacional. Para o efeito, o estágio foi estruturado em várias etapas sequenciais, que permitiram estudar a aplicabilidade da tecnologia LiDAR na monitorização dos espaços florestais. A primeira fase teve como objectivo o estudo de bibliografia referente à tecnologia LiDAR, de modo a equacionar as principais vantagens e limitações destes dados, e conhecer de que modo as suas aplicações melhoram a gestão dos espaços florestais. Numa segunda fase, estudaram-se vários programas que permitem a análise e manipulação dos dados LiDAR, de modo a delinear a melhor solução para o processamento da informação. De seguida, procedeu-se à análise dos dados LiDAR, à sua extracção e validação em campo, de modo a poder tirar ilações quanto à

precisão dos dados.

Por último, tendo em conta essa mesma precisão e conseqüente fiabilidade, aborda-se a aplicabilidade da tecnologia LiDAR no âmbito de gestão municipal dos espaços florestais, entre outros. Quanto à organização do relatório de estágio, opta-se por começar por descrever a área de estudo, o material utilizado e a metodologia adoptada, para de seguida apresentar e analisar os resultados, enquadrando-os numa perspectiva de fornecimento de serviços ao sector florestal.

2.3. Área de estudo

A área de estudo é caracterizada por três parcelas com estruturas arbóreas distintas, sendo que duas delas se encontram inseridas no perímetro do Complexo Desportivo do Jamor (CDJ): uma parcela em ambiente urbano e duas inseridas em áreas predominantemente florestais. Assim, entende-se que deve ser feita uma caracterização mais detalhada desta área, visto a área de experimentação recair maioritariamente nesta zona.

O Complexo Desportivo do Jamor (CDJ) desenvolve-se em grande parte na mata do vale do Jamor, compreendida entre as vilas de Linda-a-Velha, Queijas, Cruz-Quebrada e Caxias, a cerca de dez quilómetros de Lisboa. Administrativamente, pertence à freguesia da Cruz Quebrada-Dafundo, do Concelho de Oeiras, situado no distrito de Lisboa (Anexo III). Compreende uma área de 206 hectares, que incluem as distintas instalações desportivas, várias quintas, estradas e caminhos. Quanto à parcela em meio urbano, esta pertence à freguesia de Caxias.

2.3.1. Caracterização física

2.3.1.1. Declive e exposição

Os declives oscilam entre os limites extremos de quase plano a muito acentuado, tal como se pode observar no Anexo IV, onde estão dispostos os mapas de declive de cada parcela estudada. Grande parte da área florestal insere-se nas encostas que formam o vale do Jamor, sujeitas à forte acção do vento. Quanto à exposição do terreno, observa-se uma

dominância das vertentes Este, Sudoeste e Oeste. Ao longo do relatório, abordar-se-á a influência destes dois factores na estrutura do coberto arbóreo encontrado.

2.3.1.2. Hidrografia

Do ponto de vista hidrológico a área pertence à bacia hidrográfica da ribeira do Jamor, que por sua vez se insere na Região Hidrográfica do Tejo. O rio Jamor, afluente do Tejo, é alimentado por pequenas linhas de água, apresentando a sua época de estiagem nos meses mais quentes.

2.3.2. Caracterização climática

A caracterização dos parâmetros climáticos desta área foi obtida a partir da estação meteorológica de Lisboa/Tapada da Ajuda – A escolha desta estação baseou-se na proximidade à área de estudo e no facto de haver dados suficientes para uma caracterização fidedigna. As normais climatológicas foram obtidas na Agribase da Secção de Agricultura do Instituto Superior de Agronomia, referentes a um período de trinta anos (1951 a 1980). Não se considera relevante a apresentação destes resultados, pelo que se faz uma breve descrição das características mais importantes do clima.

2.3.2.1. Temperatura do ar

Os valores das temperaturas médias mensais apresentam um mínimo de 11°C, referente ao mês de Janeiro e um valor máximo de 22,3°C, no mês de Agosto, sendo a temperatura média anual de 16,3°C. A amplitude média anual¹ ronda os 11,3°C. O clima classifica-se, segundo estes valores, como temperado e moderado. Quanto às temperaturas mínimas absolutas, verifica-se que não existem valores inferiores a 0°C, sendo Janeiro o mês mais frio com 2,5°C. No caso das temperaturas máximas absolutas, são todas superiores a

¹ AT = TMMQ – TMMF [TMMQ = Temperatura média do mês mais quente; TMMF = Temperatura média do mês mais frio]

15°C, sendo o valor máximo obtido em Julho com 34,7°C.

2.3.2.2.Vento

Os ventos predominantes são os de NNO, NNE e ONO, sendo a direcção média do vento aproximadamente Noroeste – um quarto – Norte, o que se observa nas plantas de maior porte que existem na área: desgaste, contorção e menores ramificações do lado exposto naquela direcção.

Os ventos são fortes e distribuídos por todo o ano com máximos de velocidade em Julho e Março e mínimos em Junho e Outubro. O valor da velocidade média anual é de 17,9 m/s, o que na escala terrestre da velocidade dos ventos se classifica com a designação de “forte ou violento”, e cujos efeitos vão desde o agitar dos troncos mais novos até ao partir dos ramos. A sua acção traduz-se de um modo geral nefasta, se atendermos a que os ventos predominantes, além de serem os mais violentos, são os mais frios e os mais secos (Rodrigo, 1952).

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
Vento (m/s)	17.1	17.2	20.1	18.1	18.3	16.1	21.6	19.4	17.1	16.2	16.4	17	17.9
Direcção dominante	NE	NE	NO	NO-SO	N-NO	NO-N	N-NO	N-NO	N	NO-SO	NE	NE	

Tabela 1: Velocidades médias do vento mensais e anual em m/s e direcção dominante (média dos dados recolhidos de 1951 a 1980)

2.3.2.3.Classificação climática

A região em estudo, de acordo com a classificação climática de Köepen, é definida como forma climática Csb: Clima temperado mesotérmico húmido com inverno chuvoso e verão seco e pouco quente (temperatura média do ar no mês mais quente é menor que 22°C, havendo mais de 4 meses cuja temperatura média é superior a 10 °C).

2.3.3. Vegetação potencial e coberto existente

De acordo com a Carta Ecológica de Portugal de Albuquerque (1954), é possível

caracterizar o vale do Jamor como pertencendo à região basal Atlante-Mediterrânea (AM), que se apresenta como área de distribuição de *Quercus faginea* (carvalho português, mas onde são também encontradas espécies indicadoras como: *Quercus suber* (sobreiro), *Olea europaea* (oliveira), *Olea europaea var. sylvestris* (zambujeiro), *Castanea sativa* (castanheiro), *Pinus pinea* (pinheiro manso) e *Pinus pinaster* (pinheiro bravo).

Como foi visto acima, este relatório tem como propósito estudar a aplicabilidade da tecnologia LiDAR à gestão florestal. Tendo em conta que a arboricultura urbana é uma das responsabilidades inculcadas aos municípios, justifica-se a selecção de uma área residencial para efeitos de validação em ambiente urbano. Deste modo, apesar da extracção de informação ter sido feita para a totalidade da área de estudo, os resultados foram validados apenas numa área representativa do CDJ. Como será abordado mais à frente, seleccionou-se uma área que permitisse validar os dados LiDAR segundo vários parâmetros, nomeadamente a ocupação de solo (artificial ou florestal), a densidade do coberto florestal e o declive. A descrição pormenorizada destas áreas é feita durante o delineamento da metodologia.

CAPÍTULO 3 – MATERIAL E MÉTODOS PARA EXTRACÇÃO DE INFORMAÇÃO A PARTIR DE DADOS LiDAR

3.1. Material

3.1.1. Dados LiDAR

Os dados LiDAR contêm as três dimensões físicas do espaço (altura, comprimento e largura), sendo que as coordenadas do sistema tridimensional são representadas na forma (x, y, z). Assim, os dados de origem LiDAR contêm esta informação num formato baseado em texto, ou ASCII – *American Standard Code for Information Interchange* – que são ficheiros codificados a partir do alfabeto inglês de caracteres e símbolos. O formato mais simples dos dados LiDAR consiste num ficheiro ASCII com as coordenadas x, y, z. No entanto, os ficheiros ASCII são frequentemente de difícil utilização: por vezes podem ser extremamente grandes, o que dificulta e torna demasiado moroso o seu processamento.

O formato LAS (*Log ASCII Standard*) representa uma alternativa ao formato ASCII. Trata-se de um ficheiro binário que tem como objectivo simplificar a utilização e distribuição destes dados. Tem uma estrutura regular, ou seja um cabeçalho de 227 bytes, uma secção de registo de comprimento variável (VLR), e dados de tamanho igual em bytes. Assim, é o formato mais comum e de mais fácil manuseamento, sendo constituído por um cabeçalho, registos de comprimentos variáveis e os pontos.

3.1.2. Fotografia aérea

As imagens aéreas usadas durante o estudo correspondem aos ortofotomapas do concelho de Oeiras, em formato *MrSid*. Têm uma resolução de 0.2 metros, o que permite uma boa identificação das árvores pé a pé.

3.1.3. Programas de tratamento de informação geográfica

De modo a estruturar a informação num sistema de informação geográfica, o projecto foi organizado em várias camadas de informação espacial, de modo a criar um ambiente de trabalho que agilizasse o processamento dos dados e a sua posterior validação em campo. Este programa, denominado *ArcGIS*, divide-se em dois programas: *ArcMap*, onde é organizada a informação, e *ArcCatalog*, onde é possível processar a informação e organiza-la em bases de dados geográficas, caso necessário. No Anexo V podem observar-se os diferentes ambientes de trabalho.

3.1.4. Programa de tratamento de dados LiDAR (extracção)

No âmbito do estágio, foi estabelecido o objectivo de averiguar qual o programa de processamento de dados LiDAR que permitia uma melhor extracção de árvores. Desde modo, testaram-se os seguintes programas:

- *LiDARDS (Double Sample)*: este programa foi explorado através do manual de utilização, que descreve as principais funcionalidades e a metodologia de processamento do programa. Por ser direccionado para a produção florestal, requer um estudo prévio da área em análise com vista à aquisição de dados quantitativos sobre os produtos gerados pela exploração.

- *TerraScan*: Este programa não chegou a ser explorado pelo facto da sua utilização ser feita noutro programa que não o *ArcGIS*, o que implicaria uma migração do ambiente de trabalho previsto para um programa direccionado para desenho técnico.

- *LiDAR Analyst*: Este programa foi o que mais se adequou aos objectivos. Apesar de não ser direccionado para a gestão florestal, permite extrair informação de uma forma semi-automática. Também, não implica qualquer estudo prévio da área em análise, podendo ser aplicado em diferentes ambientes, como será abordado mais à frente.

Deste modo, optou-se por trabalhar com o programa que melhor se adequa aos objectivos propostos nesta análise, o *LiDAR Analyst*. Ao longo do relatório descrevem-se as diferentes opções disponibilizadas pelo programa, no intuito de extrair informação a partir do

processamento dos dados LiDAR. No entanto, reitera-se nesta fase que o relatório não tem como objectivo descrever programas de gestão de dados LiDAR, mas sim aferir a qualidade dos dados recolhidos pelo sensor em si.

3.1.5. Programa de tratamento de dados

De modo a estruturar a informação, organizar os resultados e fazer a análise estatística dos dados recolhidos e extraídos, usou-se o *Statistica*, um programa direccionado para o efeito. Também o programa *Microsoft Excel* foi usado sempre que foi necessário editar a tabela de atributos da informação geográfica.

3.1.6. Instrumentos para inventário florestal

3.1.6.1. Hipsómetro

Os hipsómetros medem ângulos verticais em relação ao plano horizontal. O operador coloca-se a uma determinada distância da árvore (ver ponto D da figura 5), sendo então possível calcular a altura da árvore com base em princípios trigonométricos.

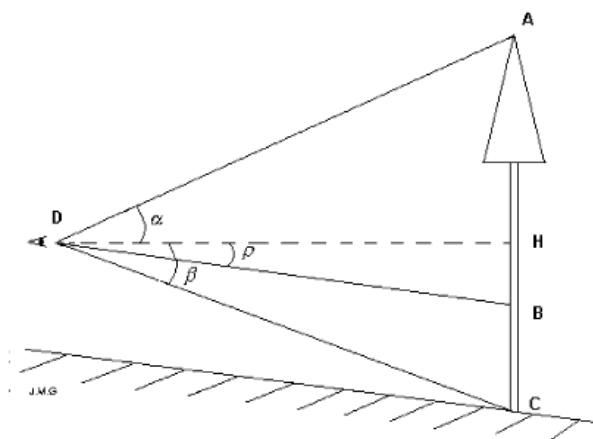


Figura 5: Medição da altura total segundo os princípios trigonométricos utilizados nos hipsómetros Vertex

O hipsómetro Vertex III (Cf. Figura 6) é o instrumento utilizado no trabalho de campo. Mede distâncias, ângulos e temperatura do ar (Barreiro e Tomé, 2005). Pode armazenar até 6 alturas por árvore.

Este hipsómetro tem duas unidades, o hipsómetro e a mira (*transponder*), que é um transmissor-receptor ultra-sónico necessário para medir distâncias (Cf. Figura 8). A mira é colocada a 1.30 metros do solo, no ponto B da Figura 5. A primeira leitura a realizar com o *Vertex* é a da distância DB e o ângulo

ρ de modo a que se possa calcular a distância horizontal, DH:

$$DH = \cos \rho \times DB$$

Então a altura total, h, com $h = AC$, será:

$$AC = 1.30 + AH + HB$$

$$AH = \operatorname{tg} \alpha \times DH$$

$$HB = \operatorname{tg} \rho \times DH$$

$$AC = 1.30 + DH (\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \rho)$$



Figura 6: Hipsómetro Vertex III

Estes cálculos são automaticamente feitos pelo aparelho, que fornece directamente a altura.

3.1.6.2.Suta

A suta (Cf. Figura 7 e 8) consiste numa barra graduada e dois braços paralelos, um fixo e outro amovível, perpendiculares à barra. São geralmente usadas quando o diâmetro das árvores não excede os 60 cm. Geralmente são de aço ou de liga de alumínio. As características requeridas para as sutas são:

- Devem ser leves, mas ao mesmo tempo robustas e estáveis face às condições climatéricas.

- Ambos os braços devem estar no mesmo plano e perpendiculares à barra no momento de medição, quando a pressão é aplicada na direcção do tronco. O braço móvel deve deslizar facilmente.



Figura 7: Suta

3.1.6.3.GPS com PDA

O GPS (Global Positioning System) permite conhecer a posição exacta no terreno. O PDA (*Personal Digital Assistant*), munido do programa de tratamento de informação geográfica para o efeito (*ArcPAD*), permite inserir informação espacial e alfanumérica e montar um projecto SIG com toda a informação relevante para o trabalho de campo. Este instrumento é imprescindível na fase de medição da altura e diâmetros do tronco de árvores no terreno (Cf. Figura 8).

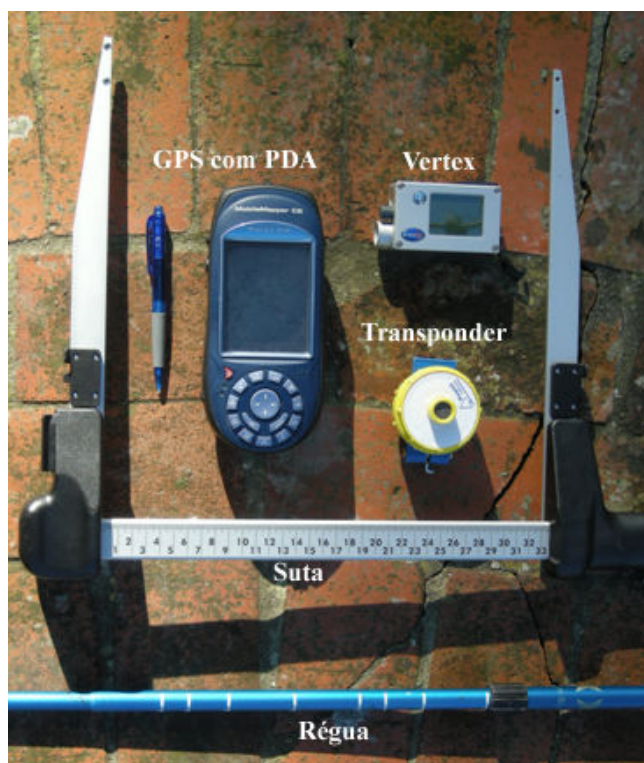


Figura 8: Material usado na fase de validação em campo

3.2. Métodos

A metodologia adoptada teve duas etapas distintas: (i) uma primeira fase de extracção da informação relativa às árvores, através do processamento de dados LiDAR, e (ii) a validação dos resultados dessa mesma extracção, que consiste na medição dos parâmetros dendrométricos em campo (altura, comprimento da copa e DAP).

3.2.1. Cartografia e Foto-interpretação da área de estudo

Nesta etapa, é essencial definir o objectivo da análise: depois de gerar o modelo digital de terreno, o algoritmo extrai a camada *edifícios*, para depois extrair a camada que representa as árvores. Considera-se, no âmbito deste projecto, que o objectivo principal é a extracção de árvores, e que a identificação dos edifícios constitui uma etapa para alcançar os objectivos principais. A identificação de estruturas artificiais elevadas torna-se importante no caso da extracção de árvores em ambiente urbano. Não obstante, a detecção de edifícios foi efectuada de modo automático pelo algoritmo de extracção do *LiDAR Analyst*, sem qualquer tipo de melhoramento dos resultados. Caso contrário, a extracção de árvores em ambiente urbano seria influenciada pela detecção visual de edifícios, em vez de recorrer a uma extracção automática através do processamento de dados LiDAR.

A partir dos ortofotomapas do concelho de Oeiras, foi possível seleccionar três parcelas distintas, consoante a estrutura e organização do coberto arbóreo presente na área de estudo:

- Parcela ZRU: Uma zona residencial urbana, com árvores ornamentais dispostas em alinhamento. A selecção desta área teve como critério a existência de arruamentos com árvores, bons acessos e uma densidade alta de prédios (ver Anexo VI). O terreno é plano, apenas com ligeiras variações de declive. Nesta parcela, as árvores são direitas e suficientemente espaçadas para os feixes de laser detectarem a árvore e os seus limites. Ocupa uma área de 5,2 hectares.

- Parcela PE: Um parque de estacionamento nas imediações do CDJ, com linhas de árvores separadas por estradas alcatroadas, num espaço que visa representar uma transição

entre a floresta densa e as árvores de arruamentos (ver Anexo VI). O terreno é plano, sendo comum observar árvores inclinadas ou sobreposição de copas de árvores diferentes. Ocupa uma área de 1,8 hectares, com declive inferior a 5%, sendo que a exposição dominante é a direcção Este. As espécies predominantes nesta parcela são a *Robinia pseudoacacia* (Pseudo-acácia) e a *Gleditsia triacanthos*, sendo possível encontrar, com menos representatividade, *Celtis australis* e *Acacia* spp. A Pseudo-Acácia encontra-se em mau estado, tendo vários ramos secos e copas dispersas e pouco densas, o que à partida dificulta o reconhecimento de copas.

- Parcela F: Uma área florestal, na qual os únicos edifícios são a *Capela de Nossa Senhora da Boa Viagem*, um farol e um marco geodésico. Ocupa uma área de cerca de 21 hectares e a orientação predominante é a direcção Sudoeste. A espécie dominante é o Pinheiro do Alepo, sendo que a maioria se encontra inclinada, devido à grande exposição ao vento que ocorre nesta zona. Na parte inferior, perto da estrada (ver Anexo VI), existem oliveiras misturadas com Pinheiro do Alepo. Para efeitos de validação, não se teve em conta a variedade de espécies, mas sim a sua altura, independentemente da espécie.

Quanto à selecção das áreas florestais dentro do CDJ (ver figura 9), esta baseou-se nas características do coberto. Tendo em conta os objectivos desta análise, procurou-se seleccionar uma área (i) onde o coberto fosse exclusivamente florestal, (ii) onde houvesse dominância de uma só espécie, e (iii) onde o declive e a densidade não fossem uniformes. Este último deve-se ao facto de, como foi referido, Huising e Gomes Pereira (1998) sugerirem que as características do terreno podem influenciar a exactidão vertical, sendo que um declive alto e/ou uma densidade do coberto elevada podem aumentar o erro na estimação. Dado ao facto de não haver qualquer estudo preciso sobre a densidade ao longo do coberto florestal, optou-se por definir os limites destas áreas por análise visual. Definiram-se duas variáveis a estudar: variabilidade do declive (maior ou menor a 30%) e densidade (alta ou baixa). Considera-se, para efeitos de validação da extracção de informação, que a diferença entre as duas classes de densidade é o facto do espaçamento entre árvores ser ou não suficiente para se conseguir ver o solo.

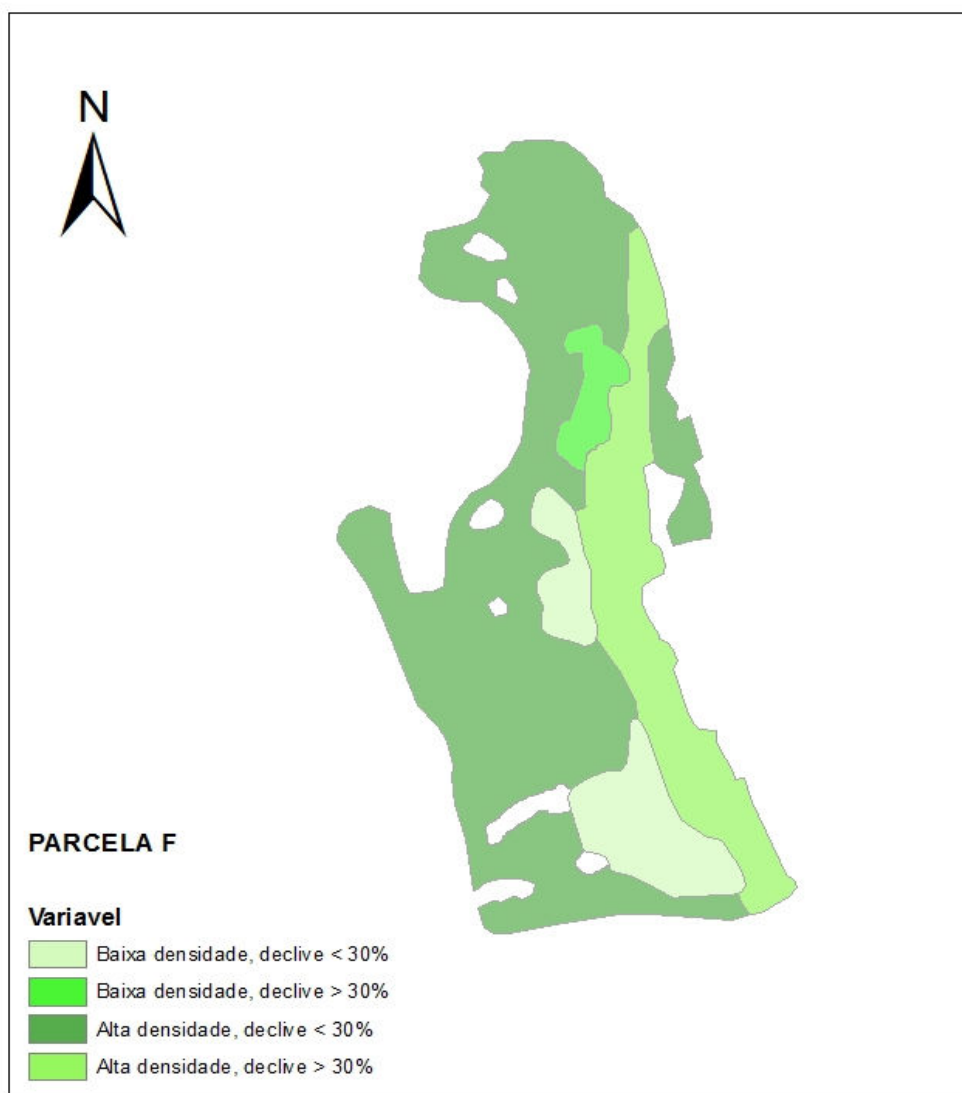


Figura 9 - Delimitação das sub-parcelas na Parcela F

Resumindo, os critérios adoptados para a delimitação das parcelas em análise são as seguintes:

- Ocupação de solo florestal;
- Homogeneidade quanto:
 - À espécie dominante;
 - À densidade

- Espaçamento entre árvores permite ver o solo: densidade baixa;
- Espaçamento entre árvores não permite ver o solo: densidade alta.
- Ao declive:
 - Superior ou igual a 30%
 - Inferior a 30%

A partir do modelo digital de terreno (MDT) extraído dos dados LiDAR, gerou-se o mapa do declive da área de estudo, e reclassificou-se a imagem em duas classes: (i) declive inferior a 30% e (ii) declive superior ou igual a 30% (ver Anexo IV). Numa segunda fase, procedeu-se à delimitação das parcelas, onde foram identificadas áreas de alta densidade e áreas de menor densidade (Cf. Figura 9). A Parcela F foi assim dividida em quatro sub-parcelas, segundo as quatro classes definidas pela combinação das variáveis em estudo (ver tabela 2 em baixo).

VARIÁVEL EM ESTUDO	PARCELA REPRESENTATIVA
Área florestal densa com declive inferior a 30%	F_ADBD
Área florestal densa com declive superior a 30%	F_ADAD
Área florestal de densidade baixa com declive inferior a 30%	F_BDBD
Área florestal de densidade baixa com declive superior a 30%	F_BDAD

Tabela 2: Variáveis em estudo na Parcela F

3.2.2. Extração de informação

Nesta fase do estágio, procurou-se otimizar os resultados da extração, de modo a obter um mapeamento de árvores o mais próximo da realidade. Não tendo sido possível conhecer o algoritmo do *LiDAR Analyst* e adaptá-lo à área e espécies em estudo, recorreu-se a uma análise visual: a partir da sobreposição dos resultados com as imagens aéreas da zona em questão, em ambiente SIG, foi possível observar e comparar diferentes comportamentos do algoritmo de reconhecimento de árvores e quantificação de variáveis dendrométricas. O

processamento dos dados LiDAR segue a sequência descrita na Figura 10, sendo que estas etapas são cíclicas, como será descrito a seguir.



Figura 10: Etapas de processamento dos dados LiDAR

A metodologia adoptada, direccionada para a extracção de árvores, permitiu a inserção de valores relativos ao terreno e às características do coberto (ver Anexo VII - a), de modo a construir um modelo de elevação do terreno fiável e detalhado. No entanto, foi necessário estabelecer uma variação sistemática dos valores introduzidos, de modo a saber em que sentido a extracção evoluiu (Cf. Figura 10). Também, a extracção foi realizada para a área que engloba as três parcelas descritas.



Figura 11 - Etapas da extração

A partir de cada Modelo Digital de Terreno gerado, e dos pontos LiDAR de primeiro e último retorno, extraíram-se os edifícios e as árvores. Compararam-se os diferentes resultados até obter a melhor representação da área em estudo, relativamente à identificação de árvores (Cf. Figura 11). Descrevem-se a seguir alguns aspectos relevantes de cada uma destas extrações.

3.2.2.1.Extração do Modelo Digital de Terreno (MDT)

Deu-se especial ênfase a esta etapa, pelo facto do MDT ser o ponto de partida e a base

da extracção de informação. O *LiDAR Analyst* permitiu definir os parâmetros do algoritmo para a melhor extracção de árvores possível, no sentido quantitativo (contagem do número de árvores). As variáveis que o programa permite fazer variar são entre outros, a amplitude do declive, as características da área florestal e da área urbana e o tamanho da janela de detecção de árvores. No Anexo VII (b), é possível observar a janela de opções e os valores óptimos, finais, que optimizam a extracção de árvores.

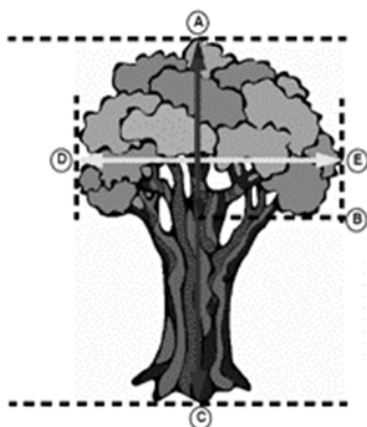
3.2.2.2.Extracção camada *edifícios*

A extracção desta camada não teve grande relevância, de modo a não influenciar a extracção de árvores. Não obstante, para efeitos de descrição do *LiDAR Analyst* e das potencialidades do programa, enumera-se a seguir alguns dos campos de informação extraída na identificação de edifícios:

- Tipo de material do telhado (liso ou plano, rugoso, entre outros);
- Área;
- Perímetro;
- Exposição.

3.2.2.3.Extracção camada *árvores*

De seguida apresentam-se algumas opções relativas aos dados LiDAR e aos seus métodos de extracção de informação.



Quando a árvore é visível de forma individual (Cf. Figura 12) pode observar-se:

- A altura mínima da copa da árvore é medida através da subtracção do ponto mais baixo da copa ao ponto mais alto (A-B);
- A altura máxima da árvore é medida desde o ponto

Figura 12 - Esquema das variáveis dendrométricas extraídas

mais alto da árvore até ao chão, de A a C;

- O comprimento é medido à cota onde a largura da copa é máxima, de D a E. Tendo em conta que a copa da árvore descreve uma forma elipsoidal, esta medida corresponde ao comprimento máximo do eixo da copa.
- *Textura das árvores*: os valores da textura são obtidos a partir do Modelo de Elevação de Terreno, sendo que o valor por defeito é de 80%. A textura tende a ter uma maior variação de cotas (z), devido à elevada variação de alturas no coberto florestal, quando comparado com os edifícios.
- *Declive das árvores*: No processo de extracção do modelo digital de terreno (solo nu), o declive mínimo da árvore é usado para eliminar algumas áreas não consideradas como floresta mas que possam ter comportamentos parecidos com aquela, em termos de variação da elevação.
- *Algoritmo de reconhecimento das árvores*: Analisando as áreas florestais identificadas previamente no processo de extracção do MDT, o *LiDAR Analyst* usa uma janela para encontrar diferenças entre o Modelo de Terreno e o primeiro retorno, dentro dos parâmetros indicados pelo utilizador. De seguida o algoritmo usa uma janela de procura para identificar o ponto mais alto da árvore.

Deste modo, o processamento dos dados LiDAR permite extrair várias medidas relativas à árvore, nomeadamente:

- Altura;
- Diâmetro do tronco;
- Comprimento da copa;

Apesar de ser possível extrair mais informação, esta análise incidiu principalmente na validação das alturas extraídas. O diâmetro do tronco foi medido apenas para uma área plana com uma baixa densidade de árvores, de modo a aferir a precisão sem influência de outras variáveis que poderiam enviesar os resultados.

3.2.3. Medição e Estimação de variáveis dendrométricas em campo

Tendo em conta que este estudo tem como objectivo determinar o grau de exactidão dos dados LiDAR, foi adoptada uma metodologia de validação comum em todos os diferentes ambientes. Numa primeira fase, foi necessário definir as características da amostragem, nomeadamente tamanho e distribuição das amostras. Assim, definiu-se o tamanho da população como o número de árvores detectadas em cada parcela.

Para um nível de confiança de 95% e um intervalo de confiança de $\pm 10\%$, foi necessário efectuar um número de medições que permitisse chegar a esta estimativa. Para o efeito contou-se o número total de árvores detectadas em cada parcela, e determinou-se o número de árvores a medir em campo (ver tabelas 3 e 4).

ID	Parcela	Número de árvores detectadas	Número de árvores a medir em campo
F	Florestal	1623	91
PE	Parque de Estacionamento	80	44
ZRU	Zona Residencial Urbana	91	47
		1794	182

Tabela 3 - Determinação do número de árvores a medir em cada parcela

De modo a obter uma representatividade de todas as classes estudadas, optou-se por realizar uma escolha aleatória de pontos, sendo que o número de amostras por parcela varia consoante a área que esta ocupa em relação ao total:

ID	Variável	Área	% de Ocupação	Número de árvores a medir
ADBD	Alta densidade, declive < 30%	13.3	63.73	58
BDBD	Baixa densidade, declive < 30%	2.54	12.16	11
BDAD	Baixa densidade, declive > 30%	0.69	3.3	3
ADAD	Alta densidade, declive > 30%	4.34	20.81	19
Total		20.88	100	91

Tabela 4 - Determinação do número de árvores a medir em cada sub-parcela da parcela F

Ao aplicar esta metodologia, é possível validar os dados em cada uma das amostras e comparar resultados entre as diferentes parcelas e sub-parcelas. Deste modo, como será

abordado mais à frente, poder-se-ão obter diferentes níveis de validação.

As medições foram efectuadas com recurso a GPS com PDA, onde se inseriram os ortofotomapas das áreas de validação, e os resultados da extracção. Deste modo, foi possível identificar as árvores detectadas no *LiDAR Analyst* e medir alturas, comprimentos de copa e diâmetros do tronco, de modo a determinar a exactidão vertical do sensor LiDAR na medição de dados dendrométricos. Os resultados e a sua respectiva análise serão apresentados no capítulo a seguir.

O trabalho efectivo de campo consistiu na medição da altura das árvores detectadas e



Figura 13: Copas irregulares, inclinadas e sobrepostas na Parcela PE

dos respectivos diâmetros à altura de 1,3 metros (a adopção deste valor em inventário florestal tem como objectivo uniformizar as medições e minimizar o erro). Para o efeito, recorreu-se a um GPS com PDA, onde se inseriram os ortofotomapas da área e os resultados da extracção de árvores. Deste modo foi possível identificar as árvores detectadas e medir os parâmetros estimados com o hipsómetro e a suta.

Quanto ao trabalho de campo em si, foram encontradas algumas dificuldades nas medições realizadas dentro do perímetro do CDJ. A parcela PE apresenta uma distribuição de árvores em linha, mas nem sempre existe uma distribuição uniforme, verificando-se com frequência sobreposição de copas (Cf. Figura 13); também, a maior parte das árvores encontra-se ligeiramente inclinada, o que é passível de induzir erros na determinação da altura pelo sensor LiDAR.

Quanto à parcela dita exclusivamente florestal, as dificuldades encontradas foram da mesma índole: árvores inclinadas e sobreposição de copas nalgumas áreas, para além de áreas de difícil acesso e terreno muito inclinado. A sobreposição das copas pode induzir em erro o algoritmo: ao não detectar o solo nas imediações da copa, o algoritmo pode admitir que se

trata de uma só árvore, pelo que altura terá o valor da copa mais alta. Quanto à inclinação, esta é ainda mais acentuada do que na parcela PE, como é possível confirmar no mapa de declives (Anexo IV). A figura 14 ilustra o estado da maioria das árvores na Parcela F.

Ao comparar as três parcelas de estudo, é necessário ter em conta as características intrínsecas de cada uma delas. Foi colocada a hipótese de que os feixes LiDAR têm



Figura 14 - Árvores inclinadas e copas sobrepostas na Parcela F

comportamentos diferentes segundo as características do coberto: a parcela F, com densidades mais altas e declives acentuados, deverá ter resultados menos precisos do que a parcela em ambiente urbano. A parcela PE, que representa um estado intermédio entre as árvores ordenadas do ambiente urbano e as árvores em ambiente florestal, deverá por essa razão apresentar valores com exactidões intermédias.

Apresentam-se de seguida os resultados obtidos nas diferentes fases do processamento de dados LiDAR.

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS

4.1. Resultados e discussão

4.1.1. Extracção de informação a partir de dados LiDAR

Como já foi referido no capítulo anterior, a extracção foi realizada através da variação dos parâmetros disponíveis no *LiDAR Analyst*, numa série de iterações com o objectivo de encontrar um resultado final que permita identificar o maior número de árvores (análise quantitativa). Nesta fase, considera-se que não é relevante demonstrar os valores reais inseridos no algoritmo de extracção, visto cada parâmetro por si só ter um impacto desconhecido na extracção, além de não ser possível quantificar a interacção e interdependência entre parâmetros. Assim, assume-se que o conjunto de valores que melhores resultados gerou foi uma combinação de parâmetros otimizados durante a sequência de extracção (ver Anexo VII - b e figuras 15, 16 e 17).

Parcela
ZRU



Figura 15: Exemplos da detecção de árvores na parcela F



Figura 16: Exemplos da detecção de árvores no Parque de Estacionamento do CDJ



Figura 17: Exemplos da detecção de árvores na parcela Florestal

4.1.2. Análise dos resultados

Como foi referido, os dados permitem uma análise a diferentes níveis, sendo que (i) o primeiro consiste na análise da totalidade dos dados, (ii) o segundo na comparação entre diferentes ambientes e (iii) o terceiro na comparação entre diferentes características do terreno e coberto (Cf. Figura 18).

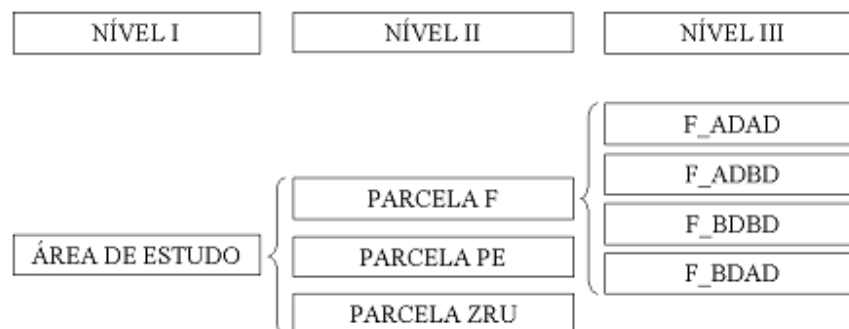


Figura 18: Níveis de Análise

Os resultados alfanuméricos são dispostos no Anexo VIII e IX (Parcelas e Sub-Parcelas, respectivamente), de modo a agilizar a análise e a visualização dos resultados.

Como foi delineado na metodologia, validaram-se as alturas em cada parcela e sub-parcela: as medições foram realizadas de modo a atingir um nível de confiança de 95% ($\pm 10\%$). Tendo em conta que um dos objectivos é a avaliação da exactidão vertical, considera-se que a correlação é o indicador mais adequado à demonstração dos resultados. Descreve-se de seguida a análise dos resultados obtidos.

A figura 19 ilustra a correlação da totalidade dos dados medidos e dos dados LiDAR, sendo que se consideram estes resultados aquém do esperado. De facto, vários estudos

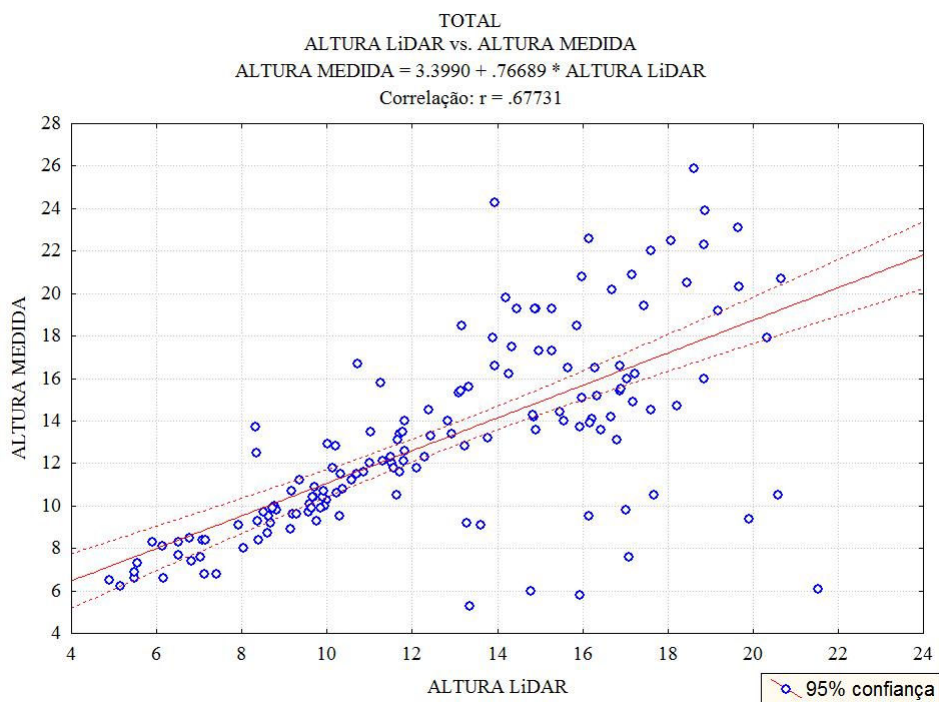


Figura 19: Gráfico que relaciona a altura extraída e a altura medida em campo

indicam uma correlação na ordem dos 90%, pelo que se formula a hipótese de que existe um erro associado à extracção ou à validação, para as características da área estudada. De facto, este gráfico ilustra a totalidade das medições, não reflectindo o comportamento do sensor em diferentes ambientes; também, a bibliografia consultada refere uma influência das características do terreno e do coberto na extracção de informação.

No intuito de analisar o comportamento do sensor LiDAR em diferentes ambientes, comparam-se no gráfico abaixo (figura 20) as correlações encontradas em cada uma das parcelas estudadas.

Variação da correlação entre altura LiDAR e altura medida

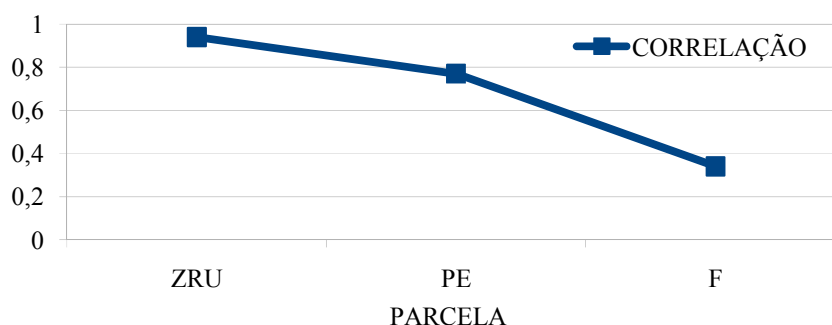


Figura 20: Gráfico comparativo entre correlações (nível II)

Como é possível observar na Figura 20, a exactidão vertical é muito diferente segundo o ambiente mapeado. Os factores que variam entre as três parcelas são a estrutura do coberto e as características do terreno, pelo que é possível reforçar a hipótese de que a grande variabilidade entre correlações poderá estar associada aqueles factores. Analisa-se de seguida a parcela Florestal, que obteve as piores correlações, na tentativa de encontrar um erro sistemático que justifique o baixo valor da correlação total. Como foi referido no capítulo da metodologia, são quatro as sub-parcelas delimitadas com o objectivo de estudar a influência das características do coberto e do terreno na extracção de informação.

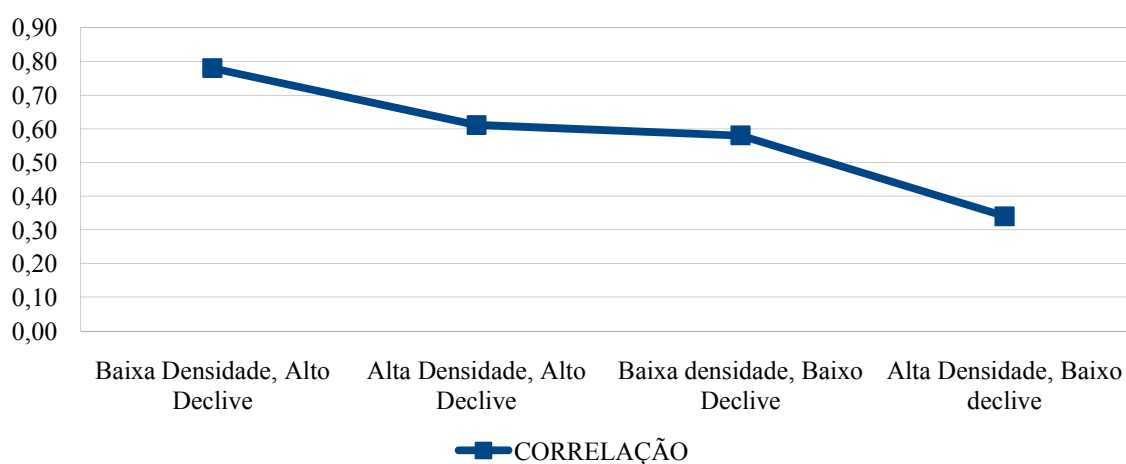


Figura 21: Comparação entre correlação das 4 sub-parcelas

O gráfico da Figura 21 descreve a exactidão vertical nas diferentes sub-parcelas. Como se pode verificar, existe uma discrepância significativa entre valores, o que indica que há de facto uma influência destes factores nas medições. No entanto, visto estas correlações corresponderem a combinações de dois factores, não é possível discernir quais aqueles que mais influência exercem.

Assim, os resultados parecem ter uma correlação mais baixa em densidades altas, sendo que um declive alto parece não ser um factor determinante para a obtenção de uma exactidão elevada. Neste ponto, torna-se evidente que as alturas medidas em ambiente florestal são as principais responsáveis pela baixa correlação total. No sentido de retirar mais informações relativas ao comportamento do sensor LiDAR, calcula-se a correlação da totalidade dos dados (ou seja das três parcelas) retirando uma sub-parcela de cada vez (Cf. Figura 22).

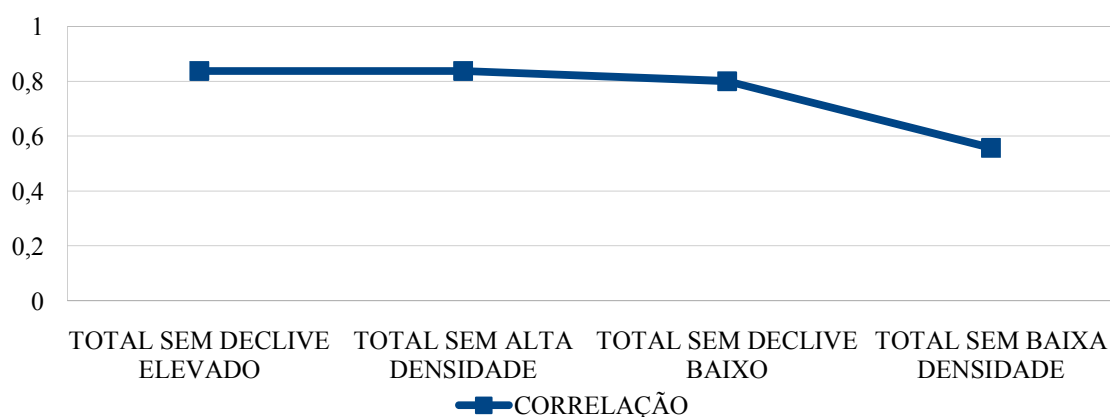


Figura 22: Gráfico Comparativo entre a correlação total sem as diferentes variáveis

Como é possível observar no gráfico acima (Cf. Figura 22), as medições LiDAR em ambientes com baixa densidade são aquelas que obtêm melhores correlações. Por outro lado, a exactidão vertical parece não ser afectada pelo factor *declive*, visto os resultados em alto e baixo declive serem semelhantes. Ao retirar da análise as medições em coberto com alta densidade, observa-se uma correlação elevada, e tendo em conta, como foi referido, que o declive por si só parece não ter grande influência na extracção, concluiu-se que a extracção

de variáveis dendrométricas é influenciada negativamente por densidades altas de coberto florestal.

Até esta fase, foi identificada a variável com maior influência no enviesamento dos dados, e por consequência na qualidade dos resultados. De modo a analisar as medições e pós-processar os dados, optou-se por realizar uma análise mais pormenorizada do comportamento do erro nas medições. De modo a representar situações reais, onde será sempre necessário um pós-processamento dos dados, introduz-se o conceito de *outlier*. Por definição, um *outlier* é uma observação pouco frequente que provoca um enviesamento dos resultados, e que muitas vezes se traduz num erro. Podem ter diferentes origens:

- Erros de localização: o GPS, por estar a receber um sinal fraco, pode ter identificado mal a árvore no ortofotomapa, em campo;
- Erros de medição: a metodologia de medição em campo baseia-se em técnicas onde é necessário apontar para o topo da copa, ponto esse que muitas vezes não é visível, e outras vezes está em movimento, sujeita a acção do vento. É de referir este facto como possível origem do erro, ilustrado pela existência de valores discrepantes na extensão das medições;
- Erros de detecção LiDAR: como foi referido na descrição da área de estudo, a elevada inclinação das árvores em terreno declivoso pode introduzir um elevado desvio na extracção da altura, traduzido por um baixo valor de correlação entre a altura estimada e a altura medida.

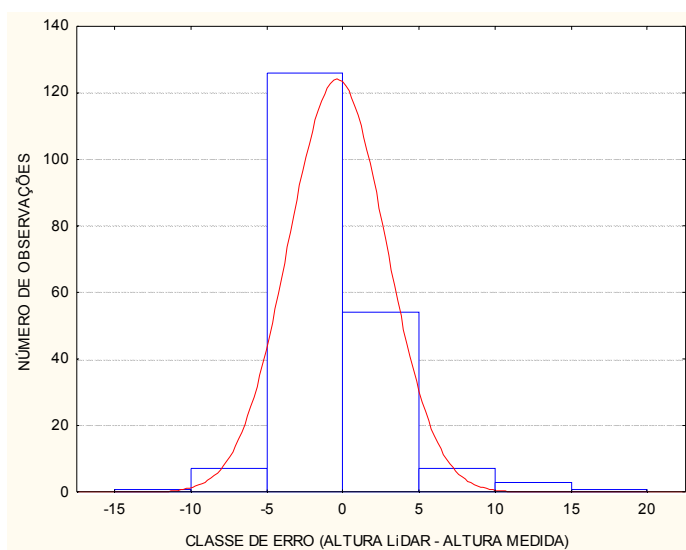


Figura 23: Frequência de observação do erro

Deste modo, tendo em conta que o número de medições realizadas ultrapassou o mínimo estabelecido para validar os resultados a um nível de 95% de confiança, esta fase da análise tem como objectivo realizar um pós-processamento de modo a eliminar pontos cujo erro enviesa os

resultados. No histograma relativo ao erro das medições totais (Cf. Figura 23: Erro = Altura LiDAR – Altura medida), onde se dispõe esta medida por classes de ocorrência, existe uma clara predominância de observações no intervalo [-5; 5]. Assim, identificam-se 3 classes de erro:

- Erros no intervalo [-5; 5]: representa a maioria das medições;
- Erros no intervalo]5; 10] e [-10; 5[: esta classe representa erros incomuns;
- Erros no intervalo [-20; -10[e]10; 20]: estes erros são considerados *outliers*.

Assim, apresenta-se de seguida a análise dos dados segundo as três classes de erro, onde foram retirados os pontos com erros absolutos superiores a 10 e 5 metros.

Erro total

Na tabela 5 dispõem-se os valores indicativos da distribuição do erro, sendo possível observar na Figura 24 a distribuição do erro, ou seja a diferença entre altura LiDAR e altura medida. Este gráfico permite concluir que

não existe um erro sistemático nas medições, podendo o sensor LiDAR sobre ou subestimar a altura real. Este facto explica

os indicadores dispostos na tabela 5. Também, a distribuição dos pontos permite, nesta fase da análise, reconhecer as diferentes parcelas ao longo do gráfico, sendo que os valores mais baixos (valores do primeiro terço da distribuição) correspondem às Parcelas ZRU e PE. No segundo e último terço do eixo horizontal observam-se os valores da Parcela Florestal, mais dispersos.

População N	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão
199	-10.3668	15.43255	3.197887

Tabela 5: Indicadores estatísticos da qualidade dos resultados

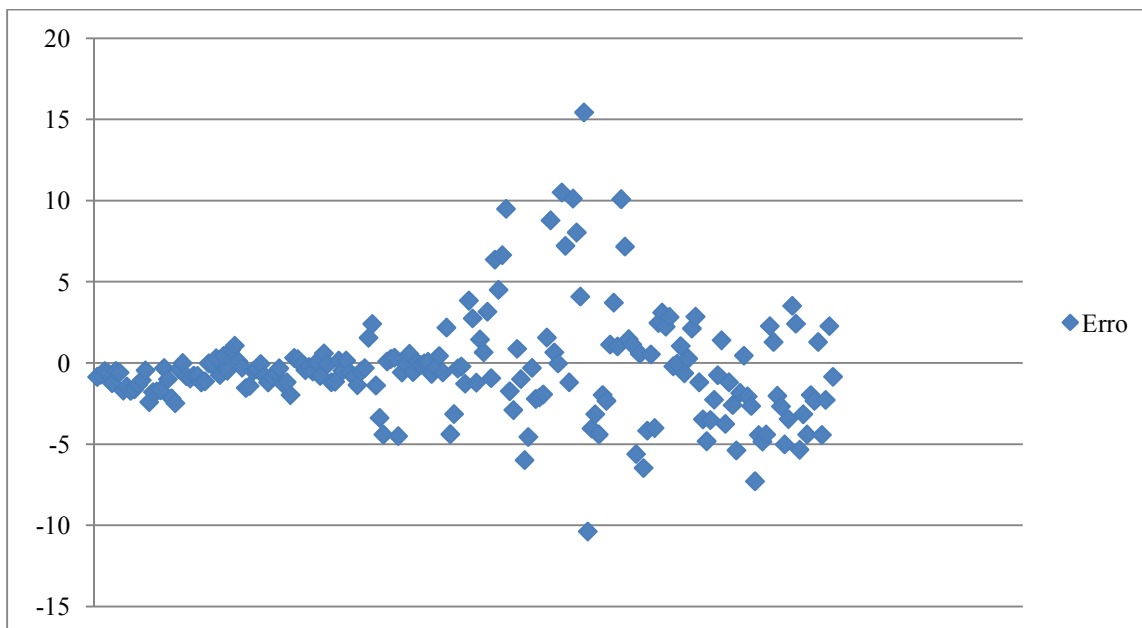


Figura 24 - Gráfico de distribuição do erro ao longo das medições

Erro <10 metros

A partir da tabela 6 reitera-se o facto do erro não ser sistemático. Também, a influência dos pontos retirados nas medições totais não é relevante, visto apenas 5 pertencerem a esta classe de erro.

População N	Mínimo	Máximo	Desvio padrão
194	-7.28107	9.492087	2.625726

Tabela 6: Indicadores estatísticos da distribuição de pontos com erro inferior a 10 metros

Quanto à figura 25, observa-se uma distribuição igual mas com uma menor amplitude de erro.

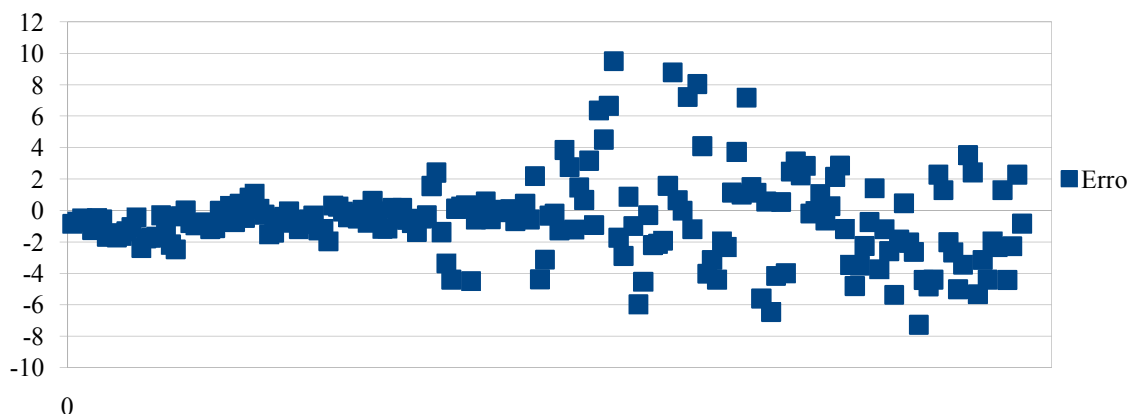


Figura 25: Distribuição do erro ($E < 10$) ao longo das medições

Erro < 5 metros

Esta etapa representa a fase final na aferição da exactidão vertical dos dados, visto não contar com os pontos que maior discrepância apresentam com as medições. Deste modo

População N	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão
180	-4.83452	4.510168	1.898622

Tabela 7: Indicadores estatísticos da distribuição de pontos com erro inferior a 5 metros

contaram-se 14 pontos que apresentavam um erro superior a 5 metros, tendo sido considerados como sendo

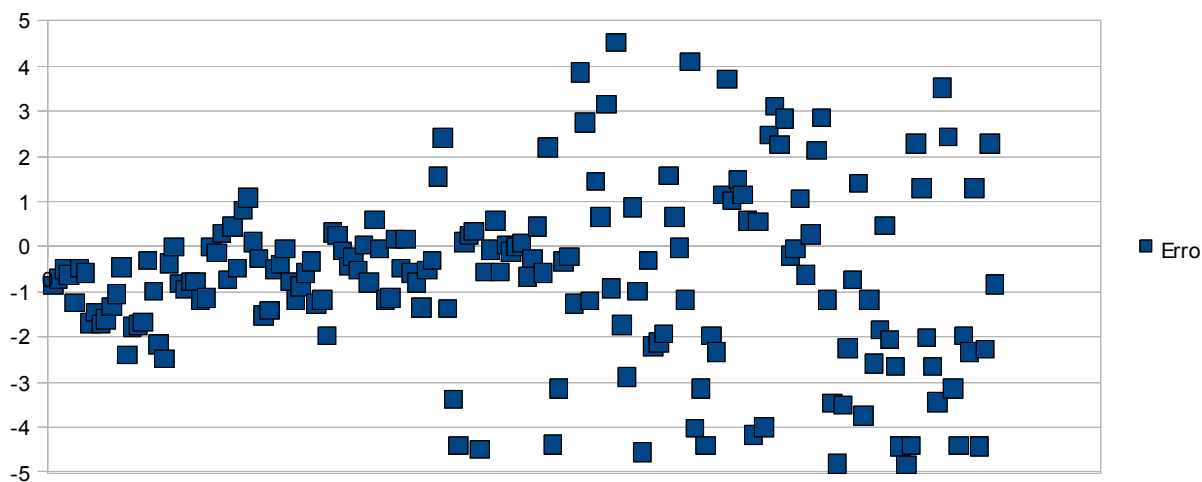


Figura 26: Distribuição do erro ($E < 5$) ao longo das medições

outliers (tabela 7).

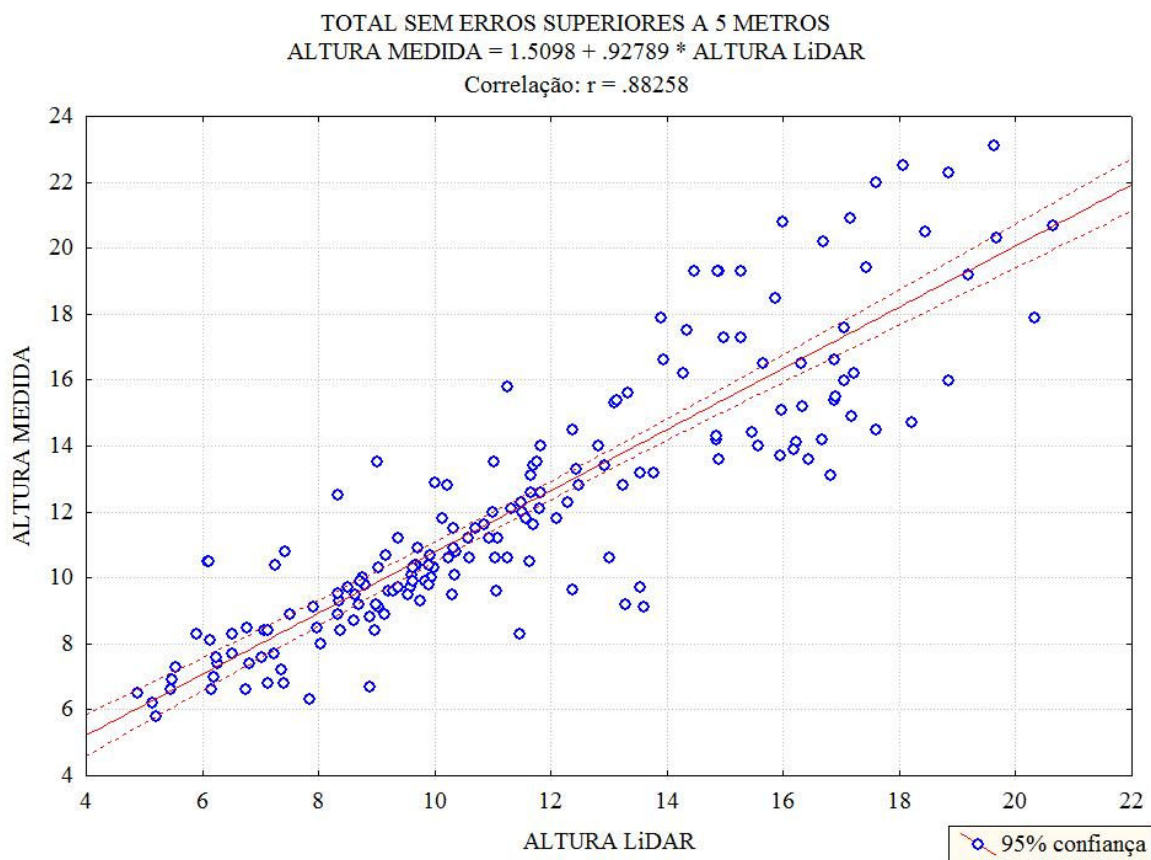


Figura 27 - Distribuição da correlação entre alturas medidas e alturas extraídas, sem erros superiores a 5 metros

Os gráficos acima (Figuras 26 e 27) reflectem assim uma variabilidade segundo as características do terreno, sem erros de medição, detecção ou localização. Este resultado permite concluir que para um intervalo de confiança de 95% ($\pm 10\%$), a exactidão vertical dos dados LiDAR é ilustrada por uma correlação de 0.88, para a totalidade da área processada, sendo que a extracção foi realizada de uma forma geral, não tendo em conta as características do terreno ou coberto. Também, a Figura 27 indica que quanto mais alta é a árvore mais os indivíduos são afastados do intervalo de confiança.

4.1.3. Considerações finais

Como foi descrito ao longo do relatório, a aferição da qualidade dos dados recolhidos

através de um sensor LiDAR aerotransportado passou por várias etapas, nomeadamente consulta bibliográfica, processamento e extracção dos dados, validação visual, medições em campo e tratamento dos resultados. Concluída a análise dos dados, faz-se de seguida um balanço da mesma, aplicando os resultados obtidos à gestão florestal.

Apesar de não haver estudos específicos sobre a aplicação desta tecnologia à realidade do coberto de solo em Portugal, a bibliografia consultada permitiu delinear os objectivos e identificar as diferentes variáveis de estudo. Também, foi possível prever o comportamento do sensor em diferentes ambientes e equacionar algumas aplicações na gestão florestal. Nesta fase insere-se também a escolha do programa de processamento de dados LiDAR mais adequado segundo os objectivos delineados, sendo que o *LiDAR Analyst* foi o programa que melhores resultados e facilidade de processamento apresentou.

De seguida, processaram-se os pontos no *LiDAR Analyst*, extraindo numa primeira fase informação sobre a variabilidade do coberto e do terreno (definição de classes de declive e densidade), e numa segunda fase o mapeamento das árvores presentes na área de estudo. A detecção de árvores teve diferentes taxas de sucesso, sendo claramente mais precisa em ambiente urbano do que em florestas densas. No entanto, este resultado foi avaliado ao nível da árvore, e não ao nível do povoamento. É possível afirmar que o sensor LiDAR, apesar de não ter reconhecido a totalidade das árvores, detectou todas as áreas florestais de dimensão relevante. A partir deste resultado, já é possível identificar as florestas presentes na área de estudo em questão, o que só por si representa uma vantagem. Ao monitorizar a distribuição dos espaços florestais, é possível incutir à gestão um carácter espacial, permitindo a integração nos instrumentos de ordenamento do território, bem como nos mapas de inventário do coberto de solo (COS e Corine Land Cover). De facto, a simples introdução de um sensor LiDAR numa cobertura ortofotográfica facilita um mapeamento automático das áreas florestais, permitindo uma classificação baseada não só na amplitude espectral mas também na altimetria de reconhecimento LiDAR. De salientar que estas cartas de ocupação do solo não têm o intuito de quantificar o coberto, mas sim de classificá-lo segundo classes definidas *a priori*. Neste sentido, este resultado já permite uma aplicação directa na melhoria das ferramentas de gestão do território em diferentes níveis de precisão. De facto, além deste mapeamento poder ser realizado para áreas muito extensas, permite

também direccionar a monitorização para a escala municipal, permitindo às autarquias inventariar os seus espaços e planear as intervenções necessárias no âmbito da exploração, conservação ou usufruto destas áreas.

A etapa seguinte teve como objectivo a validação dos resultados em campo, tendo sido delineada uma metodologia que permitisse avaliar a exactidão vertical dos dados extraídos. No intuito de estudar o comportamento do sensor LiDAR segundo alguns parâmetros que poderiam enviesar os resultados, a área de estudo foi dividida em três parcelas diferentes: (i) artificial (ambiente urbano, baixo declive, baixa densidade), (ii) semi-artificial (parque de estacionamento com árvores dispostas entre faixas alcatroadas, com baixo declive e densidade média) e (iii) natural (floresta muito densa nalgumas zonas e declives acentuados). Também, a parcela florestal foi subdividida em quatro classes, segundo o declive (baixo ou elevado) e a densidade do coberto florestal (alta ou baixa). Seleccionaram-se aleatoriamente quase 200 pontos nos diferentes ambientes, no intuito de validar os dados a um nível de confiança de 95%, com um intervalo de confiança que permitisse uma avaliação fiável tendo em conta os objectivos estipulados. Repartiram-se pelas três parcelas e sub-parcelas os pontos a medir, e com recurso a material de inventário florestal, GPS com PDA e informação cartográfica (pontos LiDAR, ortofotomapas e limites das parcelas e sub-parcelas) foi possível medir as árvores seleccionadas previamente. Como foi referido na introdução, esta análise recai sobre a variável *altura*, por este ser o ponto de partida da quantificação das variáveis dendrométricas associadas à avaliação de povoamentos florestais, nomeadamente volume de madeira, distribuição do coberto florestal segundo vários patamares, quantificação da biomassa presente no solo para efeitos de prevenção de incêndios, entre outros. Assim, uma das vantagens da tecnologia LiDAR é a obtenção da altura individual da árvore e informações sobre a estrutura das copas, possibilitando a inclusão de valores extraídos e validados nos modelos de regressão em que se baseia o inventário florestal, reduzindo o erro amostral das estimativas e melhorando por consequência o produto final. Entende-se que esta etapa deverá fazer parte de qualquer estudo envolvendo quantificações ao nível da árvore ou do povoamento, por se considerar imprescindível o nível de confiança com que se podem aplicar os resultados.

A fase de tratamento dos resultados consistiu em realizar uma análise baseada no

indicador *correlação*, entre alturas medidas e alturas extraídas. Esta foi efectuada sequencialmente em três níveis ou escalas: (i) nível I – correlação da totalidade dos pontos das três parcelas; (ii) nível II – correlação em cada parcela; (iii) correlação em cada sub-parcela. Tendo em conta que a correlação obtida no nível I ficou aquém do resultado esperado quando confrontado em com a bibliografia consultada, compararam-se as correlações em cada parcela. Verificou-se que existe em decréscimo considerável da correlação entre a parcela inserida em ambiente urbano e a parcela florestal, sendo que os resultados em ambiente artificial, plano e com árvores espaçadas (parcela urbana) foram os que maior correlação apresentaram. No nível III estudou-se a precisão dos dados extraídos segundo as características do coberto e do terreno na parcela florestal, que pior correlação apresentou. Esta análise permitiu concluir que um declive acentuado por si só não enviesava os resultados, excepto quando combinado com uma densidade florestal alta, que tem uma influência negativa no mapeamento da altimetria. A partir deste resultado, foi possível processar os dados de modo a excluir todos os pontos com um erro fora do normal, e obter uma exactidão vertical (88%), que reflecte o comportamento real de um sensor LiDAR. De facto, este parece extrair com maior precisão os objectos isolados, o que se coaduna com o método de reconhecimento LiDAR e com o facto de um varrimento com primeiro e último retorno trazer melhorias à precisão do sistema, no sentido em que fornece mais informações sobre a continuidade horizontal do coberto de solo e sobre a elevação dos objectos que a interrompe.

Quanto às aplicações dos dados LiDAR na gestão florestal, verifica-se que estas têm em comum o facto de beneficiarem quer do reconhecimento de árvores e florestas quer da quantificação de variáveis dendrométricas. Sendo a altura uma medida directa do sensor, é de senso comum que a influência desta metodologia na gestão florestal traz inúmeras vantagens e reduções de custos, além de otimizar o processo em função do objectivo estipulado. Deste modo, todos os processos a jusante são melhorados e evoluem com o aumento da eficácia destes instrumentos de gestão florestal. Descrevem-se a seguir algumas aplicações directas, para além do inerente mapeamento topográfico, capaz de gerar modelos de elevação do terreno de grande precisão.

A técnica da avaliação por amostragem, amplamente usada em inventário florestal, apresenta algumas desvantagens, nomeadamente custos elevados, associados à medição de parcelas testemunha. Com o recurso a dados LiDAR, seria possível planejar as características do voo, combinar imagens aéreas com a altimetria e extrair as alturas do coberto. Ao minimizar o trabalho de campo, que adquiriria uma mera função de validação dos dados, seria possível mapear grandes áreas com precisões elevadas, quer no âmbito temático (classificação do uso do solo) quer no âmbito da quantificação de variáveis dendrométricas. Estas são a base de qualquer estudo de avaliação do volume de madeira e biomassa e da análise da distribuição vertical e horizontal de um povoamento; por sua vez, esta avaliação permite planejar a gestão a diferentes níveis:

(i) À escala local, numa simples peritagem de um povoamento florestal, no intuito de avaliar o preço de mercado quer da propriedade, quer dos recursos nela disponíveis. Nesta escala insere-se um dos sectores mais fortes da economia nacional: a indústria papelreira. Sendo a matéria-prima um recurso natural, é imprescindível um bom planeamento das intervenções. Ao mapear as árvores e a sua altura, é possível medir os acréscimos anuais em volume e prever idades de corte e plantação. Também, as empresas recorrem frequentemente à compra de madeira a proprietários privados, pelo que se impera uma avaliação precisa do seu valor real.

(ii) À escala municipal, tendo em vista o cumprimento das orientações políticas de ordenamento do território, nomeadamente a produção da Carta de Risco de Incêndio Florestal, o planeamento das intervenções quanto à defesa da floresta contra incêndios (CMDFCI) e monitorização do estado da saúde de uma floresta, e gestão de espaços lúdicos e de recreio, cujo usufruto permanente pelas populações locais incute uma responsabilidade acrescida aos municípios;

(iii) À escala nacional, conjugando várias ferramentas como a detecção remota e os sistemas de informação geográfica, seria possível a) obter mapas de ocupação de solo mais precisos quanto à distribuição dos espaços florestais, b) fazer o balanço anual do volume de biomassa e carbono acumulado, c) planejar políticas de intervenção para uma gestão integrada no mercado e na preservação dos espaços florestais. Também, as áreas protegidas poderiam também ser acompanhadas mais eficazmente, nomeadamente no que toca à

variabilidade anual e sazonal dos habitats de espécies protegidas.

A perspectiva espacial, baseada em processos de extracção de informação obtida remotamente, é um meio cada vez mais recorrente no mapeamento de objectos no solo, tendo em vista a sua classificação para efeitos de monitorização e gestão. Os espaços florestais adquirem importância a vários níveis, quer no que toca à sua função lúdica como à sua função de protecção dos solos e conservação de espécies protegidas. Neste sentido, entende-se que a tecnologia LiDAR vem complementar a gestão florestal, inculcando-lhe uma maior precisão e fiabilidade, quer nas medições ao nível da árvore, quer da distribuição espacial do coberto florestal. No entanto, toda a análise deverá ter em conta a variabilidade da qualidade dos dados extraídos em diferentes ambientes, pelo que se impera uma validação em campo. Da análise dos resultados conclui-se que a identificação de árvores e a extracção da altura obtiveram resultados muito próximos da realidade, pelo que se considera o sensor LiDAR capaz de inculcar grande qualidade na modelação de espaços florestais. Considera-se assim que se cumpriram os objectivos de aferição da exactidão vertical dos dados LiDAR na área de estudo, além de prever a sua aplicabilidade na gestão florestal a diferentes escalas e com diferentes objectivos.

Referências Bibliográficas

- ANDERSEN, H.E.; McGAUGHEY, R.J.; REUTEBUCH, S.E. *Estimating forest canopy fuel parameters using LIDAR data. Remote Sensing of Environment*, 2005.
- ANDERSON, L. O.; SHIMABUKURO, Y. E.; DEFRIES, R. S.; MORTON, D. *Assessment of Deforestation in Near Real Time Over the Brazilian Amazon Using Temporal fraction Images Derived From Terra MODIS. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2005.
- ARAÚJO, M.A. et al. *Avaliação do potencial de produtos derivados de aeronaves não tripuladas na actividade florestal. Revista Ambiência, Guarapuava, v.2 Edição Especial 1, 2006.*
- DIEDERSHAGEN, O., KOCH, B. e WEINACKER, H., s/data, *Automatic segmentation and characterisation of forest stand parameters using airborne lidar data, multispectral and Fogis data* (URL: http://www.isprs.org/commission8/workshop_laser_forest/, consultada em 14-05-2009)
- DGRF, *5º Inventário Florestal Nacional. Manual de instruções para a realização do trabalho de Foto-interpretação*, 2005.
- DIEDERSHAGEN, O., KOCH, B., WEINACKER, H, SCHÜTT, C. *Combining LiDAR and GIS data for the extraction of forest inventory parameters. ScandLaser 2003, Umeå, Sweden, 2003.*
- DGRF. *5º Inventário Florestal Nacional. Manual de instruções para a realização do trabalho de campo*, 2005.
- ELMIRO, DUTRA, MURA, SANTOS, FREITAS. *Avaliação de dados de altimetria da floresta amazónica baseados nas tecnologias INSAR, LiDAR e*

- GPS. Revista Brasileira de Cartografia No 58/03, Dezembro 2006.
- EVANS, D. *Forest Assessments with LiDAR. From Research to Operational Programs*. Sem data.
 - GONÇALVES, G., GONÇALVES-SECO, L. *Utilização de dados LiDAR na classificação de objectos situados em zonas rurais*. sem data.
 - GONÇALVES, G. *Análise do erro de interpolação em Modelos digitais de superfície urbanos obtidos por varrimento laser*. Actas da IV Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia. Lidel, 2005.
 - KWAK, D.A., LEE, W.K., SON, M.H. *Application of LiDAR and digital aerial photograph for precise forest inventory*. Sem data.
 - PARKER, R.C., EVANS, D. *LiDAR Forest Inventory with Single-Tree, Double and Single-Phase Procedures*. Sem data.
 - PETERSON, B. *Use of LIDAR for Forest Inventory and Forest Management Application*. 2005 Proceedings of the Seventh Annual Forest Inventory and Analysis Symposium, 2005.
 - PIRES, J. *Uso do LiDAR para estimação da altura de árvores em povoamentos de eucalipto*. Sem editora. 2005.
 - STEFAN LANG, S. TIEDE, D., MAIER, B. BLASCHKE, T. *3D Forest structure analysis from optical and LIDAR data*. *Ambiência Guarapuava, PR* v.2 p. 95-110 Edição Especial, 2006.
 - TOMÉ, M. *Inventariação de Recursos Florestais, Volume IV - Amostragem aplicada à inventariação de recursos florestais*. Grupo de Inventariação e Modelação de Recursos Florestais, 2003.
 - TOMÉ, M. *Inventariação de Recursos Florestais, Volume II - Caracterização e monitorização de povoamentos e matos*. Grupo de Inventariação e Modelação de Recursos Florestais, 2003.
 - TOMÉ, M. *Inventariação de Recursos Florestais, Volume I - Introdução à*

inventariação e monitorização de recursos florestais. Grupo de Inventariação e Modelação de Recursos Florestais, 2003.

- VISUAL LEARNING SYSTEMS. *LiDAR Analyst 4.2. for ArcGIS – Reference Manual*. Overwatch, 2007.