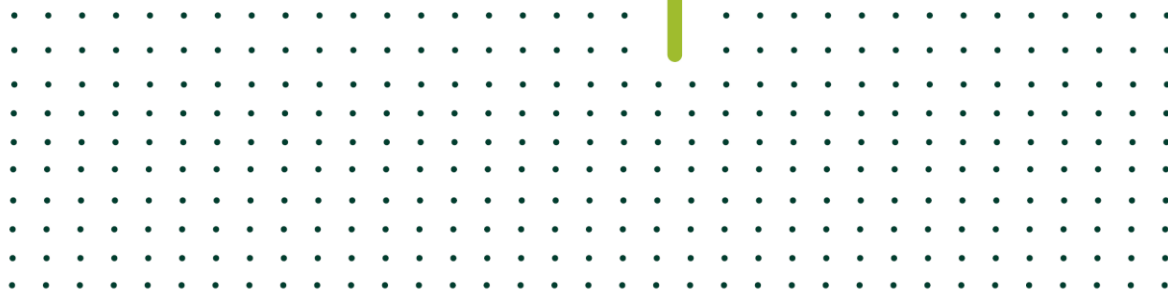


rePLANT



Relatório da análise de dados LIDAR tratados, nas áreas experimentais, para quantificação de biomassa

PPS 1. Atividade A.1.3. | Deliverable E.1.3.2.

Versão 1 | maio de 2023

TAREFA A1.3.1.

Luis Pádua, UTAD, Jani Pires, UTAD, André Sandim, UTAD, Joaquim João Sousa, UTAD,
Domingos Lopes, UTAD



www.replant.pt

grounding collaborative strategies for integrated mngt of forests & fire

Cofinanciado por:



Índice

1. Introdução	3
2. Material e Métodos	4
2.1. Áreas de estudo	4
2.2. Dados LIDAR	5
2.3. Metodologia de inventário florestal	5
2.3.1. Trabalho de inventário	5
Parcelas de amostragem	5
Medições na componente arbórea	6
Trabalho de campo relativo ao estrato arbustivo:	7
2.3.2. Avaliação da biomassa	7
Para o estrato arbóreo	7
Quantificação de biomassa de arbustivas	9
2.4. Tratamento dos dados LIDAR	11
2.4.1. Pré-processamento	11
2.4.2. Normalização da topografia	12
2.4.3. Extração de parâmetros	13
2.5. Análise dos dados	15
3. Resultados e discussão	16
3.1. Caracterização dos dados	16
3.2. Correlação das variáveis	20
3.3. Estimativa de biomassa total	23
3.3.1. Eucalipto	23
3.3.2. Pinheiro	24
3.3.3. Arbustivas	25
4. Conclusões e perspetivas de melhoria	26
5. Referências bibliográficas	27

1. Introdução

No contexto do Projeto rePlant, a TAREFA A1.3.1., intitulada: OTIMIZAÇÃO DA AQUISIÇÃO DE DADOS LIDAR PARA QUANTIFICAÇÃO DE BIOMASSA (com o líder: Labelec; e os participantes: Amorim, Altri, NVC, EDPD, INESC TEC, FEUP, UTAD; 2020-01-01 a 2022-06-30), estava planeada como estruturante, dentro do objetivo O3 (PPS1).

Era objetivo principal desta tarefa aumentar o conhecimento sobre o estado atual da floresta portuguesa, através da utilização de deteção remota e técnicas de inventário expedito que permitam precisões equivalente às tecnologias atualmente usadas, mas com atualizações mais frequentes e reduções de custo-

Era ainda objetivo desta tarefa, a atingir, o ajustamento de equações para estimativa da biomassa a ser feito em colaboração com a UTAD. O processamento de dados a ser feito em colaboração com a UTAD. A componente de análise de dados florestais estava planeado ser feita em colaboração com a UTAD, o que aconteceu.

Neste contexto, foi escrito este relatório final, que descreve as metodologias de campo e de gabinete, que visam o tratamento das informações dendrométricas recolhidas, do tratamento dos dados LIDAR, recolhidos pela Labelec, bem como do ajustamento de modelos de estimativa da biomassa total, a partir das nuvens de pontos geradas.

2. Material e Métodos

2.1. Áreas de estudo

As áreas de estudo incidem sobre quatro zonas de Portugal continental (localização na Figura 1). Duas das áreas de estudo estão localizadas na região Norte do país, no Parque das Serras do Porto e no Vale do Tâmega, em Ribeira de Pena (A e D na Figura 1, respetivamente). As restantes duas áreas de estudo localizam-se no Centro, na Serra da Lousã nos concelhos de Góis e Castanheira de Pêra, e no Alentejo, no concelho de Nisa (B e C na Figura 1). Ao nível de espécies florestais analisadas, o *Eucalyptus globulus* está presente em maioria em três das quatro áreas de estudo (Serras do Porto, Góis e Nisa), existindo parcelas de *Quercus* spp. nas zonas estudadas de Nisa e Ribeira de Pena, nomeadamente, três parcelas em Nisa (uma composta por *Quercus ilex* e duas compostas por *Quercus suber*) e em Ribeira de Pena uma parcela de *Quercus suber*. Já a espécie *Pinus pinaster* está presente em maioria nas zonas estudadas em Ribeira de Pena, existindo ainda duas parcelas de *Pinus pinaster* e *Pinus nigra* em Góis.

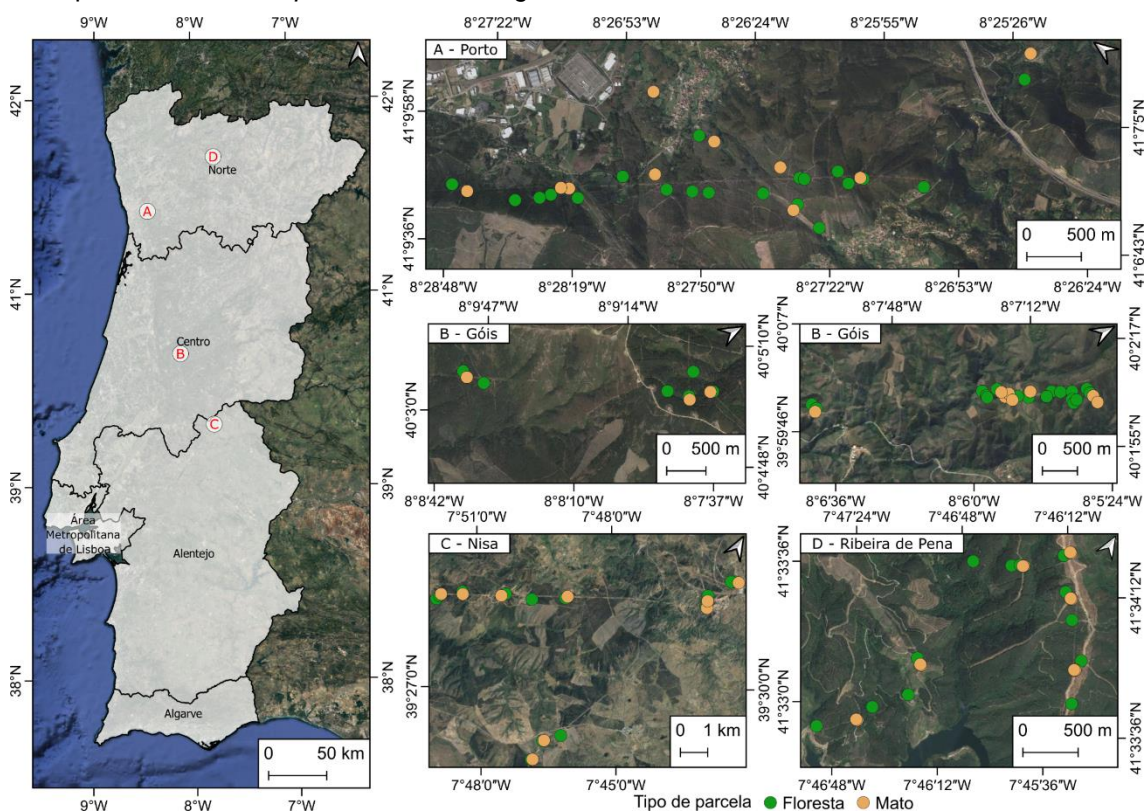


Figura 1. Localização das áreas de estudo em Portugal continental e das respetivas parcelas de amostragem em cada uma das zonas estudadas. Imagens do Google Earth.

2.2. Dados LIDAR

Quando aos dados LIDAR estes foram adquiridos de forma a abrangerem as áreas de estudo definidas. Foram realizados levantamentos aéreos através um VANT com um sensor LIDAR acoplado de forma a adquirir nuvens de pontos tridimensionais georreferenciadas nas áreas de estudo. No total, foram recolhidos dados em três áreas do Parque das Serras do Porto (27.5 GB), em cinco áreas de Góis e Castanheira de Pêra (21 GB), em cinco áreas de Nisa (153 GB) e três em Ribeira de Pena (29 GB). Para além dos pontos tridimensionais, algumas das áreas que foram alvo de levantamento em Nisa e Góis também contêm informação associada relativa à cor (RGB) em cada ponto estimado. Todas as áreas levantadas em Ribeira de Pena possuem informação relativa à cor dos pontos.

Cada nuvem de pontos foi entregue dividida em vários ficheiros LAS (LASer)—formato desenhado para permitir o acesso a dados de nuvem de pontos LIDAR—havendo a necessidade de realizar a junção da informação adquirida em cada uma das áreas onde foram realizados levantamentos aéreos.

2.3. Metodologia de inventário florestal

Para a obtenção dos dados relativos às parcelas de amostragem selecionadas nas diferentes áreas de estudo, foi realizado um levantamento no terreno com o objetivo principal de quantificar os stocks de biomassa em povoamentos florestais e em parcelas arbustivas.

2.3.1. Trabalho de inventário

Parcelas de amostragem

O trabalho de campo foi desenvolvido no norte de Portugal (Serras do Porto e Vale do Tâmega), centro de Portugal (Serra da Lousã), e também na região do Alentejo (perto de Niza), no contexto do projeto Replant. Em todas as regiões ocorreu a floresta de eucalipto. No Norte, as parcelas de amostragem nas Serras do Porto foram quase exclusivamente instaladas em povoamentos de *Eucalyptus*, enquanto que no Vale do Tâmega a maioria das parcelas foram instaladas em povoamentos de *Pinus*. No centro foram recolhidos dados em parcelas de *Eucalyptus* e *Pinus*. No Alentejo foram recolhidas informações em povoamentos de *Eucalyptus globulus* e *Quercus*.

Para a mensuração arbórea de povoamentos de *Pinus*, de *Eucalyptus*, e outras espécies que não o sobreiro, foram estabelecidas parcelas circulares de amostragem de 500 m², referentes ao plano horizontal. Em parcelas de *Eucalyptus* e *Pinus*, foram também estabelecidos dois transeptos perpendiculares de 10 m cada para a quantificação da biomassa arbustiva, independentemente de se

encontrarem num contexto florestal ou apenas contendo estrato arbustivo. Nas parcelas de sobreiro, para as medições arbóreas, foram instaladas parcelas circulares de amostragem de 2000 m², também referentes ao plano horizontal. No contexto de *Quercus suber*, a quantificação da biomassa dos arbustos foi baseada em dois transeptos perpendiculares de 20 m cada.

Medições na componente arbórea

Em contexto de áreas inclinadas, antes de se instalar a parcela de amostragem, a inclinação do terreno foi medida com recurso a um inclinómetro. Daqui resultou a avaliação do raio corrigido da parcela de amostragem, já que a área de uma parcela de amostragem (neste caso de 500 m² para quase todos os povoamentos, à exceção dos de sobreiro, onde o raio era de 2000 m²) é sempre considerada no plano horizontal. Para uma parcela circular, como é o caso, o raio corrigido é obtido a partir de:

$$cr = \frac{r}{\sqrt{\cos \alpha}} \quad (1)$$

sendo cr , o raio corrigido a estabelecer no terreno; r , o no plano horizontal e α a inclinação do terreno (°).

- 500 m² de parcela de amostragem (raio horizontal=12,62 m);

- Foi assumido que árvores com altura superior a 2.0 m eram consideradas para mediação, à exceção de povoamentos jovens (onde mais de 50% das existências têm altura inferior a 1.3 m), em que todos os indivíduos eram medidos.

Foram realizadas as seguintes etapas de trabalho de campo:

1. A inclinação do terreno foi avaliada com recurso a um inclinómetro;
2. Foi instalada uma parcela de amostragem de 500 m² na maioria dos povoamentos (2000 m² no caso dos povoamentos de sobreiro);
3. Em contextos de inclinação superior a 5°, o raio a instalar era o raio corrigido dado por:

$$\bar{R} = \sqrt{\frac{R.R}{\cos \alpha}} = \frac{R}{\sqrt{\cos \alpha}} \quad (2)$$

4. No centro da parcela de amostragem foram recolhidas as coordenadas GPS;



- Em parte das parcelas de amostragem eram identificadas as seguintes métricas:

- A espécie identificada;
- O diâmetro á altura do peito (DAP); e
- Nas três árvores mais próximas de cada classe de d (10, 15, 20, 25, ..., cm) era ainda medida:
 - a altura total (ht);
 - a altura da base da copa (hc); e
 - a projeção da copa segundo as direções Norte/Sul e Este/Oeste (CD_{NS} ; CD_{EW}).

Para se obterem mais informação dos povoamentos florestais e, em simultâneo, poderem se testar diferentes metodologias na estimativa da biomassa com recurso a dados LIDAR, num número mais reduzido de parcelas de amostragem, foi intensificado o conhecimento dendrométrico das características de todas as árvores que se incluíam dentro da parcela de amostragem. Sendo identificado:

- A identificação da espécie de cada árvore;
- O DAP de cada árvore;
- As latitude e longitude do posicionamento de cada árvore;
- A altura total de cada árvore (ht);
- A altura da base da copa de cada árvore (hc); e
- A projeção da copa segundo as direções Norte/Sul e Este/Oeste (CD_{NS} ; CD_{EW}) de cada árvore.

Trabalho de campo relativo ao estrato arbustivo:

Em termos de metodologia para o estrato arbustivo foi realizada a mediação da área ocupada por cada espécie arbustiva ao longo de cada um dos dois transeptos de 10 m (20 m para o caso dos povoamentos de Quercus), bem como a altura média de cada espécie.

2.3.2. Avaliação da biomassa

Para o estrato arbóreo

As equações de biomassa aplicadas neste trabalho tiveram como base as que foram utilizadas pelo 6º Inventário Florestal Nacional Português, e foram baseadas em estudos desenvolvidos por Tomé et al. (2007), Faias et al. (2007) e Soares e Tomé (2004):

As equações parciais para estimativa de biomassa em povoamentos de *Pinus pinaster*, foram:

Biomassa do tronco *Pinus* (ws): $ws = 0.0146.dap^{1.94687}.ht^{1.106577}$

Biomassa da casca *Pinus* (wb): $wb=0.0114.dap^{1.8728}.ht^{0.6694}$

Biomassa dos ramos *Pinus* (wbr): $wbr=0.00308.dbh^{2.757606}.\left(\frac{ht}{dap}\right)^{-0.39381}$

Biomassa das folhas *Pinus* (wl): $wl=0.09980.dbh^{1.392518}.\left(\frac{ht}{dap}\right)^{-0.71962}$

Biomassa total acima do solo *Pinus* (wa): $wa=ws+wbr+wl$

Biomassa radicular *Pinus* (wr): $wr=0.2756*wa$

Biomassa total *Pinus* (wt): $wt= wa+wr$

Para a *Eucalyptus globulus*, as equações para estimativa parcial de biomassa:

Biomassa do tronco *Eucalyptus* (ws): $ws=0.009964.dap^{1.780459}.ht^{1.369618}$, if $hdom>10.7100$

$ws=0.009964.dap^{\beta 2}.ht^{1.369618}$, if $hdom\leq 10.7100$

$$\beta 2 = \frac{hdom}{-0.70909+0.627861*hdom}$$

Biomassa da casca *Eucalyptus* (wb): $wb=0.000594.dap^{2.379475}.ht^{1.0849888}$, if $hdom>18.2691$

$wb=0.000594.dap^{\beta 2}.ht^{1.0849888}$, if $hdom\leq 18.2691$

$$\beta 2 = \frac{hdom}{-0.69951+0.45855*hdom}$$

Biomassa dos ramos *Eucalyptus* (wbr): $wbr=0.095603.dap^{1.674653}.\left(\frac{ht}{dap}\right)^{-0.85073}$

Biomassa aérea total *Eucalyptus* (wa): $wa=ws+wbr+wl$

Biomassa das raízes *Eucalyptus* (wr): $wr=0.2487*wa$

Biomassa total *Eucalyptus* (wt): $wt= wa+wr$

Para a *Quercus suber*, as equações de biomassa parciais foram:

Biomassa do tronco principal e troncos secundários *Quercus* (wwsbr): $wwsbr=284.2881 \cdot cu^{2.9646}$

Biomassa dos ramos *Quercus* (wbr): $wbr=108.5769 \cdot cu^{1.3464}$

Biomassa foliar *Quercus* (wl): $wl=22.5773 \cdot cu^{1.1690}$

Biomassa da cortiça virgem, em árvores sem extração, (wbv1): $wbv1=0.960006 \cdot du^{1.300779}$

Biomassa da cortiça virgem, em árvores com extração *Quercus* (wbv2): $wbv2=98.137 \cdot cu^{2.2999}$

Biomassa aérea total *Quercus* (wa): $wa=ww+wbr+wl$

Biomassa das raízes *Quercus* (wr): $wr=0.063777 \cdot du^{2.07779}$

Biomassa total *Quercus* (wt): $wt=wa+wr$

A altura dominante (hdom) é, por definição, a altura média das 100 árvores mais grossas por hectare. Isto significa que para avaliar a altura dominante numa parcela de amostragem de 500 m², se deve medir a altura média das cinco árvores mais grossas dentro da parcela. A hdom foi avaliada para cada parcela de amostragem, em cada uma das espécies. Esta era muitas vezes uma das variáveis de *input* na estimativa das biomassas parciais, para as espécies florestais em análise.

Em termos da biomassa da componente arbórea, a biomassa parcial de cada árvore foi estimada recorrendo às equações alométricas apresentadas anteriormente, baseadas em *inputs* DAP, ou dbh+hdom; A biomassa total, que resulta da soma das biomassas parciais, foi também avaliada, para cada parcela de amostragem. Este valor foi então extrapolado para um hectare.

Quantificação de biomassa de arbustivas

Quase sempre o transepto teve 10m de comprimento (apenas nos povoamentos de sobreiro passou a ter 20 m de comprimento). Foram instalados no terreno dois transeptos perpendiculares. A distância de cobertura e a altura média de cada espécie arbustiva, ao longo do transepto, eram registados. Era então possível determinar a percentagem de cobertura para cada espécie, em cada transepto.

A Biomassa da vegetação arbustiva foi avaliada de acordo com a metodologia proposta pela equipa de Fernandes, P., como consta na sua publicação (Conti et al. 2019).

De seguida, o cálculo da Biomassa por metro quadrado foi realizado, recorrendo-se a modelos alométricos já ajustados. Por exemplo:

$$\text{Biomassa } Erica \text{ (Kg m}^{-2}\text{)} = 0.844+h(m)^{-0.741}$$

$$\text{Biomassa } Ulex \text{ (Kg m}^{-2}\text{)} = 3.239+h(m)^{-0.539}$$

Posteriormente, foi calculada a estimativa da biomassa por metro cubico:

$$B \text{ (Kg m}^3\text{)} = B \text{ (Kg m}^2\text{)}*h, \text{ onde } h \text{ representa a altura media de cada espécie arbustiva.}$$

E, finalmente, a percentagem de cobertura é usada para obter um valor de ponderação de biomassa para cada área de estudo específica:

$$B \text{ (Kg m}^3\text{)} = B \text{ (Kg m}^3\text{)}*CV/100, \text{ onde } CV \text{ é a área de cobertura da arbustiva em cada área de amostragem.}$$

A Tabela 1 apresenta alguns dos valores médios de biomassa arbustiva, para algumas das espécies arbustivas encontradas nas parcelas de amostragem, de acordo com Conti et al. (2019).

Tabela 1. Valores de biomassa de arbustivas, tabelados, considerados no estudo

Espécie	h (m)	kg/m ² , para uma cobertura do solo de 100%	kg/m ³ , para uma cobertura do solo de 100%
<i>Genista</i>	0.5	2.313	
<i>Cytisus</i>	0.5	1.059	
<i>Erica</i>	0.1		4.649
<i>Ulex, Hakea</i>	0.5		4.706
<i>Ulex</i>			5.986
<i>Arbutus</i>			1.807
<i>Cistus</i>	0.5	0.466	
herbaceous			0.500
<i>Rubus</i>			1.000
<i>Fetus</i>			0.226
<i>Acacia dealbata</i>			3.400
<i>Eucalyptus</i> (regeneração)			3.400
<i>Pinus pinaster</i> (regeneração)			3.400

2.4. Tratamento dos dados LIDAR

Para se realizar a extração de diferentes parâmetros para cada parcela, as nuvens de pontos LIDAR adquiridas passam por um processo composto por três etapas, sendo estas: 1) pré-processamento; 2) normalização da topografia e; 3) extração de parâmetros. Esta metodologia é apresentada na Figura 2.

Figura 2. Fluxograma ilustrativo dos principais passos aplicados para o tratamento e extração das nuvens de pontos LIDAR.

2.4.1. Pré-processamento

Visto que a totalidade das nuvens de pontos de cada área monitorizada estão separadas em diferentes ficheiros LAS, correspondendo a várias nuvens de pontos, é necessário realizar uma etapa de processamento prévia para a junção da informação de cada ficheiro numa única nuvem de pontos. Para realizar a junção dos vários ficheiros, utilizou-se o software *CloudCompare* (versão 2.12.1). Após este passo foi realizada uma operação de limpeza da nuvem de pontos, removendo-se pontos duplicados ou completamente isolados (correspondendo a ruído). Assim, a função *SOR filter* (*Statistical Outlier Removal*), presente no *CloudCompare*, foi utilizada para realizar esta operação. Esta operação calcula a distância média de cada ponto em relação à sua vizinhança (considerando os k vizinhos mais próximos para cada ponto, sendo k correspondente ao número de pontos da vizinhança, parâmetro de entrada do método). Em seguida, são descartados os pontos que estão mais distantes do que a distância média mais um número de vezes o desvio padrão (segundo parâmetro de entrada do método). Assim uma nova nuvem de pontos é gerada como output da aplicação do método SOR onde os pontos indevidamente estimados (ruído) são excluídos, contribuindo para uma melhor distribuição dos pontos e consequente redução do número total de pontos.

Em seguida é realizado o recorte das parcelas inventariadas no terreno (Figura 3). Esta operação foi realizada no sistema de informação geográfica (SIG) QGIS. Ao centro de cada parcela foi

aplicado um buffer com um determinado raio de forma a gerar uma circunferência correspondente à totalidade da área analisada para cada parcela. Após a obtenção das circunferências das parcelas, estas são utilizadas para recortar os pontos referentes às mesmas nas nuvens de pontos. Esta operação foi realizada no QGIS através da função *lasclip* da biblioteca LASTOOLS (rapidlasso GmbH, Gilching, Alemanha). Cada parcela, após devidamente recortada, foi sujeita a uma operação de remoção manual de pontos correspondentes a *outliers*, como são o caso de cabos elétricos, esta operação foi realizada através do software *CloudCompare*.

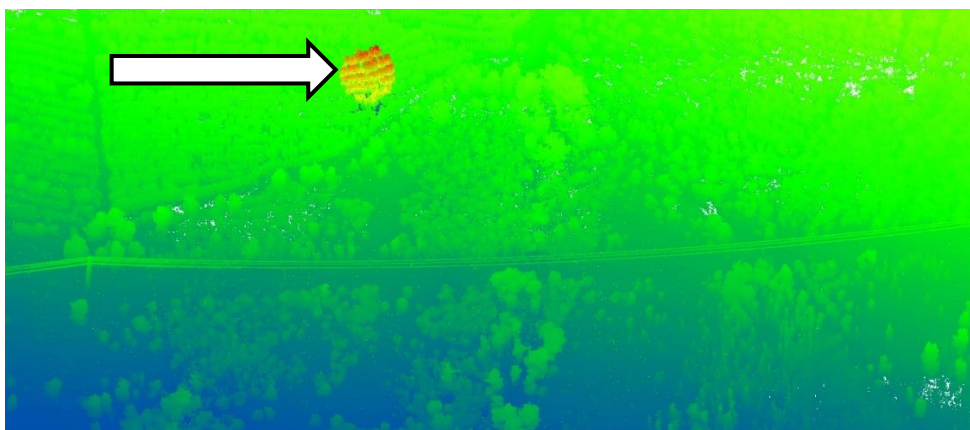


Figura 3. Fluxograma ilustrativo dos principais passos aplicados para o tratamento e extração das nuvens de pontos LIDAR.

2.4.2. Normalização da topografia

Após a obtenção das parcelas devidamente recortadas, para cada nuvem de pontos, e após a remoção de pontos que poderiam influenciar a análise, pode-se passar à segunda fase do método, a normalização da topografia. Este processo é aplicado a cada parcela para lidar com variações na elevação dos pontos, tornando-os comparáveis e mais consistentes, transformando-se a altitude esplanada no eixo Z em alturas, como demonstrado na Figura 4. Para tal é necessário realizar a distinção entre os pontos pertencentes e não pertencentes ao solo. A segmentação do solo é uma etapa de pré-processamento para isolar os pontos pertencentes à vegetação para a extração de métricas florestais. A segmentação do solo a partir dos dados LIDAR foi realizada através do algoritmo Simple Morphological Filter (SMRF) (Pingel et al., 2013). Este algoritmo consiste em três etapas: criação de um mapa da superfície com a elevação mínima a partir dos dados da nuvem de pontos; segmentação dos elementos pertencentes ao solo, dividindo-o dos restantes; e segmentando em seguida os dados originais da nuvem de pontos.

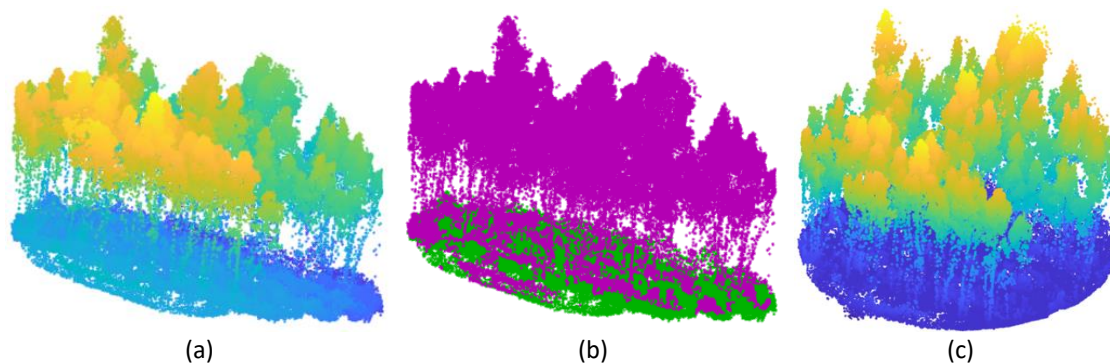


Figura 4. Demonstração do processo de normalização da topografia: (a) nuvem de pontos não normalizada; (b) segmentação do solo através do algoritmo SMRF, pontos classificados como solo a verde; e (c) nuvem de pontos normalizada.

A normalização da topografia é depois realizada para eliminar o efeito das diferenças topográficas nos pontos da vegetação. Assim, a altitude é transformada em alturas, usando-se os pontos identificados como solo através do algoritmo SMRF. Isto é realizado para garantir que a elevação dos pontos é comparável e uniforme entre e na própria parcela. É realizada uma interpolação para estimar a elevação (Z) do solo para cada ponto da nuvem de pontos. Por fim, é feita a normalização da nuvem de pontos através subtraindo a elevação interpolada do solo à elevação de cada ponto (Figura 4c). Após a normalização da nuvem de pontos é realizada uma remoção de pontos de acordo com o cenário que se pretende avaliar, os pontos que apresentam uma altura acima, no caso de parcelas arbustivas, ou abaixo de um determinado valor limiar, para parcelas arbóreas, são removidos da nuvem de pontos. Este passo é realizado para evitar a influência de pontos que possam distorcer a representação da topografia. Em seguida, é realizada uma triangulação dos pontos da nuvem de pontos normalizada e filtrada, este processo é atingido através da criação de uma delimitação que envolve os pontos 3D, possibilitando a extração do volume. Para atingir esta finalidade, foi aplicado o algoritmo alphaShape (Edelsbrunner & Mücke, 1994) que possibilita a criação de polígonos complexos, considerando a irregularidade das geometrias das áreas florestais monitorizadas. A malha de triângulos (mesh) produzida após a aplicação deste método é criada através do fornecimento das coordenadas de cada ponto (X, Y, Z) e de um valor de raio (α), que define o raio de ligação entre os pontos.

2.4.3. Extração de parâmetros

Após a filtragem da nuvem de pontos é possível extrair uma série de parâmetros para cada parcela a ser analisada. Os parâmetros extraídos têm como base vários percentis de altura, após serem

descartados os pontos fora do limiar definido no passo anterior. No caso de parcelas arbóreas, a extração de parâmetros baseia-se nos pontos com altura igual ou superior a 2 metros. Já para as parcelas de matos foram considerados todos os pontos com uma altura menor que 2 metros. Foram então extraídos três tipos de parâmetros, com base em no valor de diversos percentis obtidos com base na altura dos pontos de cada parcela. Os parâmetros podem-se dividir em altura, densidade das copas, área de projeção, volume e dispersão. Os parâmetros de altura, são obtidos através da medição, dos percentis 25, 40, mediana, 75, 90, 95, bem como a altura média e máxima (exemplificação na Figura 5). Para a densidade do copado, área e volume, são considerados os valores para os pontos acima de 2 metros (valor mínimo), bem como para cada valor dos percentis estimados nas alturas (25, 40, mediana, 75, 90, 95) e altura média. A densidade do copado é a proporção da floresta coberta pela projeção vertical das copas das árvores (Ma et al., 2017), calculado através da proporção de pontos da vegetação em relação à área em análise. Da mesma forma a área do copado, tem como base a área da projeção vertical das copas em relação à área das parcelas em análise, de forma a aos dados estarem normalizados entre as diferentes parcelas, este valor é depois convertido de metros quadrados para hectares. Uma conversão semelhante foi aplicada para o volume, transformando o valor obtido em m³ha⁻¹. Além disso, a dispersão da altura dos pontos é medida através de variância, desvio padrão e amplitude. Em cada parcela são ainda extraídos dados relativos à qualidade das nuvens de pontos, como é o caso do número total de pontos, os pontos classificados como solo e como vegetação.

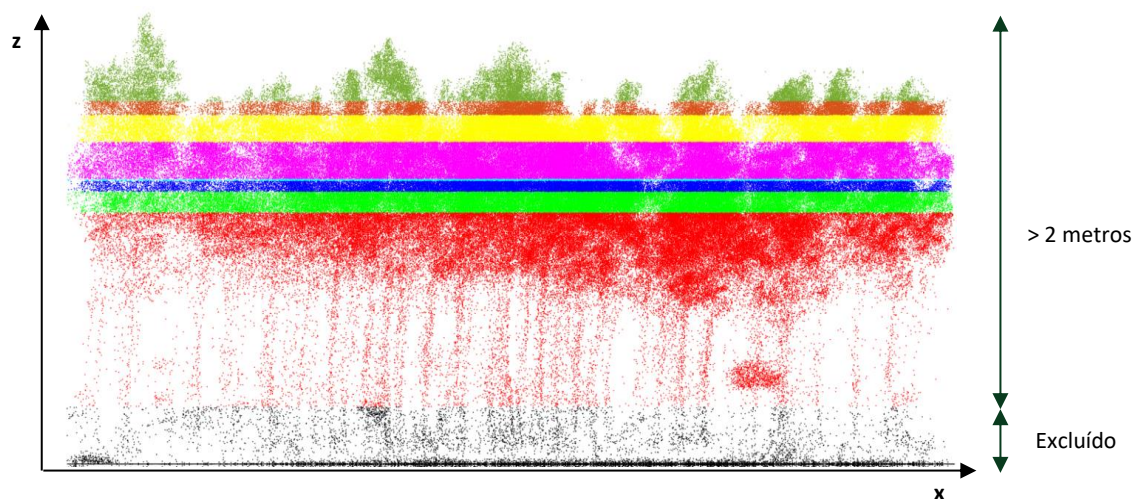


Figura 5. Fluxograma ilustrativo dos principais passos aplicados para o tratamento e extração das nuvens de pontos LIDAR.

2.5. Análise dos dados

Após a extração dos parâmetros geométricos e de dispersão, para cada parcela, foi criado um conjunto de dados (*dataset*) de acordo com a espécie ou tipo de parcela para aferir a biomassa total. No total foram criados quatro conjuntos de dados (Eucalipto, Pinheiro, Sobreiro e arbustivo). Cada conjunto de dados foi sujeito a uma análise prévia para a aferição de qualidade com vista à remoção de parcelas não representativas de cada espécie. Este passo foi efetuado para verificar parcelas que não tenham qualidade suficiente para serem utilizadas neste estudo devido à falta de pontos nos dados fornecidos ou por representarem uma discrepância em relação às restantes parcelas.

Após a filtragem das parcelas, em cada conjunto de dados, segue-se a etapa de da seleção das métricas a utilizar. Para tal, foi utilizado o coeficiente de correlação de Person (r) tendo-se apenas utilizado métricas com um valor de $r > 0.50$. Para o ajuste dos modelos de regressão de biomassa total foi utilizada uma abordagem de regressão por *stepwise*. Esta técnica foi selecionada pois a escolha das variáveis preditivas a utilizar no modelo final é realizada através de um processo automático composto por várias etapas. Em cada etapa é adicionada ou removida uma variável de entre as fornecidas inicialmente. Assim, como entrada no modelo, apenas são utilizadas métricas com uma correlação forte ($r > 0.5$), dando-se preferência à seleção de apenas um tipo de métrica para a altura, densidade do copado, área das copas, volume e dispersão. Desta forma, reduz-se o número de métricas a serem utilizadas no modelo final e a respetiva influência de métricas do mesmo tipo para o modelo final, evitando-se casos de multicolinearidade.

A última etapa prende-se com a avaliação de vários modelos de regressão multivariada, utilizando-se as métricas previamente selecionadas. Os modelos com melhor desempenho são selecionados para validação num subconjunto de dados que não foram utilizados na etapa de treino com vista à sua aferição final. O desempenho dos modelos é avaliado de acordo o coeficiente de determinação (R^2), a raiz do erro quadrático da média (RMSE), e do seu erro médio absoluto (MAE). Por fim, os modelos foram utilizados para prever o valor de biomassa em áreas mais, de acordo com a espécie dominante, nas diferentes zonas de estudo.

3. Resultados e discussão

3.1. Caracterização dos dados

Após a aplicação dos métodos descritos na secção 2.4. verificou-se a existência de casos em que existiam parcelas alvo de inventário florestal em zonas que não continham dados. O número de casos em cada zona de estudo é reportado na Tabela 2. Assim sendo, após a seleção das parcelas, ficou-se com um total de 58 parcelas arbóreas e 11 arbustivas. De entre as parcelas florestais com eucalipto 17 estão localizadas no Parque das Serras do Porto, outras tantas em Góis, e nove em Nisa, perfazendo um total de 43 parcelas. As 15 parcelas compostas por pinheiro estão distribuídas entre Góis e Ribeira de Pena, com quatro e 11 parcelas, respetivamente. As quatro parcelas com sobreiro estão localizadas em Nisa e Ribeira de Pena (uma e três, respetivamente). Já as parcelas arbustivas selecionadas encontram-se distribuídas por todas as zonas de estudo com quatro no Parque das Serras do Porto, três em Góis, e 2 em Nisa e Ribeira de Pena.

Tabela 2. Número de parcelas alvo de inventário florestal por tipo e área de estudo, quantas não continham dados e o número de parcelas que foram utilizadas no estudo.

Zona	Inventariadas		Com dados		Selecionadas	
	Arbóreas	Arbustivas	Arbóreas	Arbustivas	Arbóreas	Arbustivas
Serras do Porto	20	10	18	9	17	4
Góis	25	12	25	10	19	3
Nisa	14	9	14	6	10	2
Ribeira de Pena	12	6	12	6	12	2
Total	71	37	69	31	58	11

A não seleção de determinadas parcelas prendeu-se com vários motivos. Como reportado na Tabela 2, a inexistência de dados LIDAR em parcelas inventariadas verificou-se em duas parcelas arbóreas no Parque das Serras do Porto. Nas parcelas arbustivas não existiam dados numa parcela do Parque das Serras do Porto, em duas parcelas de Góis e em três parcelas de Nisa. Contudo existem parcelas que apesar de conterem dados LIDAR, não apresentavam uma densidade de pontos suficiente para serem consideradas como selecionadas. Um exemplo deste tipo de caso é demonstrado nas parcelas não consideradas de eucalipto (Figura 6a). Outro fator que levou a desconsiderar outras parcelas de eucalipto prende-se com a existência de parcelas em plantações mais jovens que as restantes (Figura 6b e c), correspondendo a valores anómalos em relação ao total da amostra (como é igualmente o caso da parcela da Figura 6d).

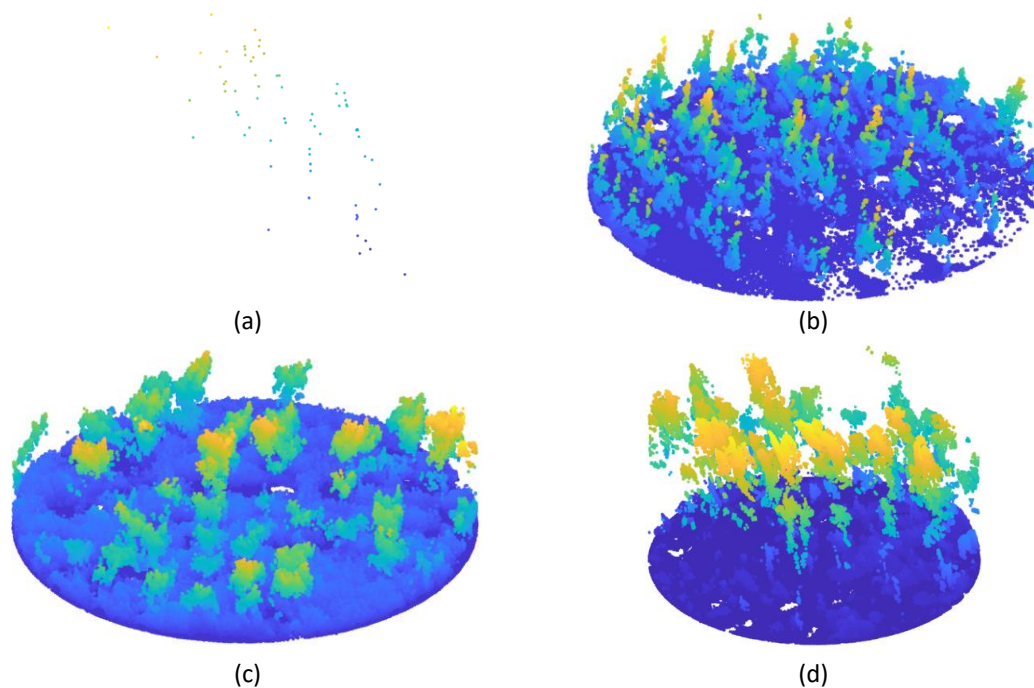


Figura 6. Parcelas de eucalipto não consideradas com localização no Parque das Serras do Porto (a), em Góis (b, c), e em Nisa (d). Representação das nuvens de pontos, após a aplicação da normalização da topografia.

Quando às parcelas de pinheiro, foram excluídas duas parcelas de *Pinus Nigra*, em Góis, e uma parcela, em Ribeira de Pena, que continha árvores de *Pinus pinaster* e *Eucalyptus globulus*. Estas três parcelas, apresentadas na Figura 7, influenciavam a dispersão da quantificação da biomassa total em relação às restantes parcelas constituídas por *Pinus pinaster*.

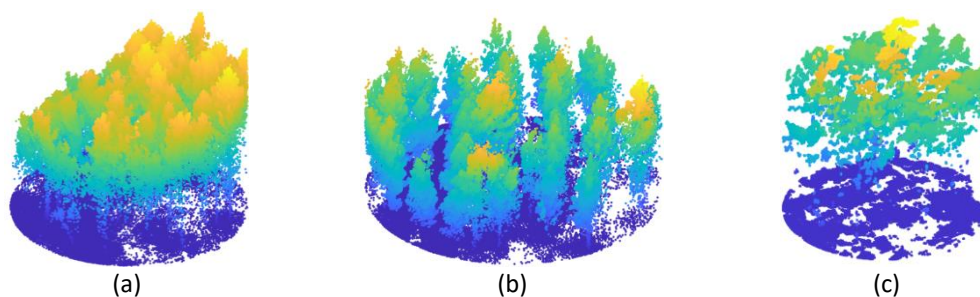


Figura 7. Parcelas de pinheiro não consideradas: parcelas de *Pinus nigra* em Gois (a—b) e parcela mista de *Pinus pinaster* e eucalipto.

Já a exclusão de parcelas arbustivas prendeu-se com a existência de algum roído, baixa densidade de pontos, falta de relevo. Algumas destes casos estão demonstrados nas parcelas expostas na Figura 8.



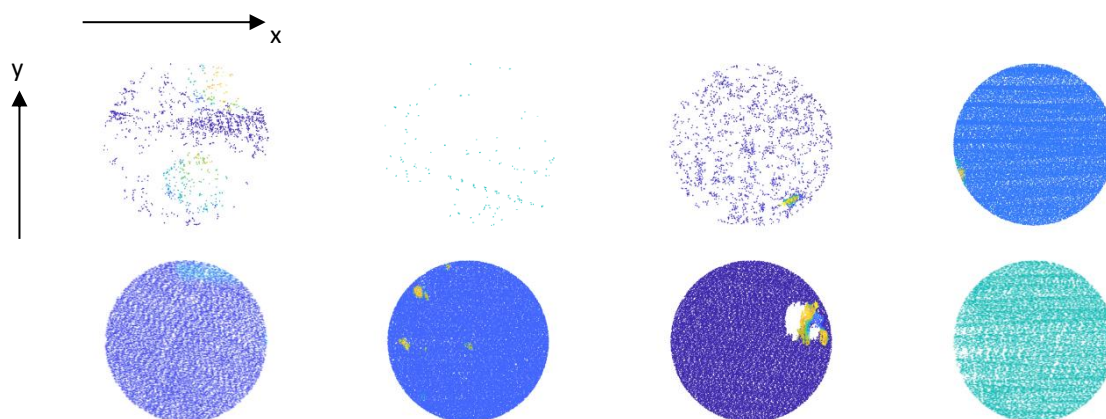


Figura 8. Perspetiva X—Y de parcelas arbustivas não consideradas.

De entre as espécies em estudo, e de acordo com as parcelas selecionadas, o valor médio de biomassa total mais elevado é observado em parcelas de pinheiro (423 t ha^{-1}), seguindo-se das parcelas de sobreiro e de eucalipto (Tabela 3). O valor mais baixo de biomassa total, de entre as três espécies arbóreas analisadas, pertence a uma parcela de eucalipto (3 t ha^{-1}), seguindo-se das parcelas de sobreiro e de pinheiro, com 21 e 117 t ha^{-1} , respetivamente. No que concerne às parcelas arbustivas, observa-se um valor médio mais baixo do que nas parcelas arbóreas (4.6 t ha^{-1}) sendo que estas variam entre 0.15 e 12.4 t ha^{-1} .

Tabela 4. Caracterização da biomassa total (t ha^{-1}) das parcelas utilizadas em cada espécie. Estatísticas calculadas referentes à média; mínimo; máximo; mediana; SD: desvio padrão; P_{25} e P_{75} : percentil 25 e 75.

Espécie	Média	SD	Mínimo	P_{25}	Mediana	P_{75}	Máximo
Eucalipto	42	26	3	25	40	57	108
Pinheiro	423	192	117	321	453	546	681
Sobreiro	67	41	21	39	71	99	105
Arbustivas	4.63	3.49	0.15	2.38	4.83	5.96	12.39

A distribuição da altura máxima das parcelas utilizadas (Tabela 5) revela que as parcelas de pinheiro possuem uma altura mais elevada (18.7 m), em média, em comparação com as parcelas de eucalipto (14.9 m) e de sobreiro (7.63 m). As parcelas de pinheiro variam entre 9.7 m e 26 m enquanto que as parcelas de eucalipto variam entre 6.6 m e 21.7 m , já as de sobreiro apresentam um valor mínimo de 4 m e máximo de 11.6 m . As parcelas arbustivas selecionadas têm um valor médio de 0.8 m variando entre 0.6 e 1.4 metros.

Tabela 5. Caracterização da altura máxima das parcelas utilizadas em cada espécie. Estatísticas calculadas referentes à média; mínimo; máximo; mediana; SD: desvio padrão; P_{25} e P_{75} : percentil 25 e 75.

Espécie	Média	SD	Mínimo	P_{25}	Mediana	P_{75}	Máximo
Eucalipto	14.93	3.57	6.61	12.86	14.48	17.25	21.65
Pinheiro	18.69	4.95	9.66	16.99	18.66	22.58	25.99
Sobreiro	7.63	3.60	4.00	4.93	7.49	10.20	11.55
Arbustivas	0.83	0.30	0.55	0.62	0.67	1.02	1.44

As estatísticas da densidade do copado nas parcelas selecionadas para cada espécie é apresentada Tabela 6. Em média, as parcelas de pinheiro apresentam uma maior densidade (38%), seguindo-se as parcelas de eucalipto e sobreiro (21% e 20%). A mesma tendência é seguida para os valores máximos de densidade, com 68% para uma parcela de pinheiro, 45% para eucalipto e 40% numa parcela de sobreiro. O valor mínimo das três espécies arbóreas analisadas é de 1% para uma parcela de eucalipto, e 3% para pinheiro e sobreiro. Nas parcelas arbustivas a densidade média é de 6%, variando entre 0.1% e 17.1%, valores muito inferiores quando comparando com as parcelas arbóreas.

Tabela 6. Caracterização da densidade do copado das parcelas utilizadas em cada espécie, considerando a altura mínima definida (2 metros em parcelas arbóreas e 0 nas parcelas arbustivas). Estatísticas calculadas referentes à média; mínimo; máximo; mediana; SD: desvio padrão; P_{25} e P_{75} : percentil 25 e 75.

Espécie	Média	SD	Mínimo	P_{25}	Mediana	P_{75}	Máximo
Eucalipto	20.7%	10.3%	1.1%	12.9%	19.8%	28.7%	45.2%
Pinheiro	37.6%	19.9%	2.9%	28.2%	36.3%	45.4%	67.8%
Sobreiro	20.0%	17.6%	2.9%	6.5%	18.6%	32.1%	39.9%
Arbustivas	5.8%	5.5%	0.1%	2.7%	3.8%	7.2%	17.1%

A área de projeção do copado (Tabela 7) apresenta um valor médio que segue as tendências das métricas já abordadas, com valores mais elevados nas parcelas de pinheiro (5059 m² ha⁻¹), seguindo-se as parcelas de eucalipto (3318 m² ha⁻¹) e sobreiro (3096 m² ha⁻¹). A mesma tendência é verificada nos valores máximos. As parcelas arbustivas têm um valor médio de 1877 m² ha⁻¹ variando entre 29 m² ha⁻¹ e 7108 m² ha⁻¹.

Tabela 7. Caracterização da área ($\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$) das parcelas utilizadas em cada espécie, considerando a altura mínima definida (2 metros em parcelas arbóreas e 0 nas parcelas arbustivas). Estatísticas calculadas referentes à média; mínimo; máximo; mediana; SD: desvio padrão; P_{25} e P_{75} : percentil 25 e 75.

Espécie	Média	SD	Mínimo	P_{25}	Mediana	P_{75}	Máximo
Eucalipto	3318	1511	140	2342	3306	4290	6673
Pinheiro	5059	2644	329	4144	4606	6626	9444
Sobreiro	3096	2790	484	974	2729	4850	6441
Arbustivas	1877	2017	29	556	1711	2373	7108

Quando se analisa o volume obtido nas parcelas para cada espécie (Tabela 8) a discrepância entre as espécies é menor, com as parcelas de pinheiro a apresentarem o valor médio mais elevado ($3922 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$), seguindo-se das parcelas de eucalipto ($3198 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$) e de sobreiro ($2256 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$). O menor e maior valor é observado em parcelas de eucalipto, sendo $7 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$ e $13603 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$. O volume nas parcelas arbustivas é de $313 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$ variando entre os $2 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$ e $984 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$.

Tabela 8. Caracterização do volume ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$) das parcelas utilizadas em cada espécie, considerando a altura mínima definida (2 metros em parcelas arbóreas e 0 nas parcelas arbustivas). Estatísticas calculadas referentes à média; mínimo; máximo; mediana; SD: desvio padrão; P_{25} e P_{75} : percentil 25 e 75.

Espécie	Média	SD	Mínimo	P_{25}	Mediana	P_{75}	Máximo
Eucalipto	3198	3023	7	1437	1928	4370	13603
Pinheiro	3922	3115	54	1585	3631	4476	11199
Sobreiro	2256	2343	151	347	1994	3902	4884
Arbustivas	313	330	2	64	155	511	984

3.2. Correlação das variáveis

A correlação individual de cada métrica com a biomassa total das parcelas de eucalipto é apresentada na Figura 9. É claramente perceptível que o tipo de parâmetros com correlação mais elevada é a altura, o valor de r varia entre 0.85, para a altura máxima, e 0.93 para a altura média. Todas as métricas de dispersão atingiram uma correlação acima de 0.5, sendo esta mais elevada para a amplitude (0.85) e menor para a variância (0.51). A densidade do copado à altura no percentil 90 revelou a maior correlação (0.53) para esta métrica, a correlação mais fraca 0.25 observou-se no percentil 95. Para a área das copas em cada valor de altura, apenas foi acima de 0.5 quando no cálculo acima dos 2 m (valor mínimo) com $r = 0.51$ enquanto que nas restantes métricas da área obteve-se $r < 0.5$. Já as métricas relacionadas com o volume revelaram obter a correlação mais fraca aquando comparadas com os outros parâmetros extraídos, sendo que o volume no percentil 90 obteve 0.39 e na altura mínima obteve-se (0.26).

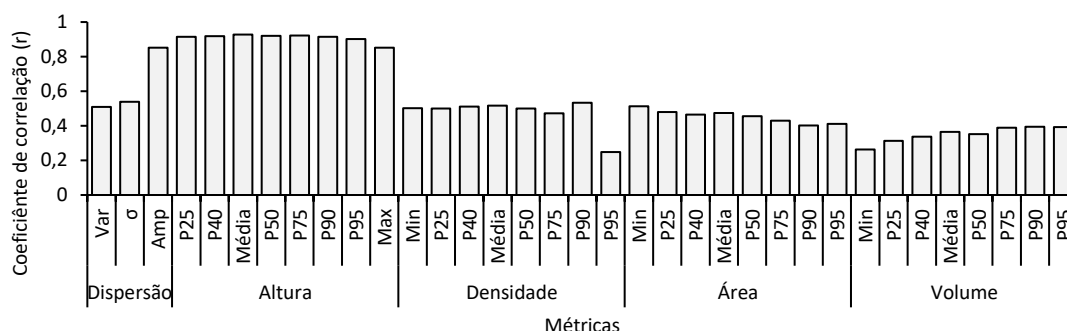


Figura 9. Correlação das diferentes métricas extraídas com a biomassa total para parcelas de eucalipto.

A Figura 10 apresenta a correlação das parcelas de pinheiro em cada métrica com a biomassa total. Uma vez mais, a altura é o parâmetro com maior correlação, variando entre $r = 0.93$ (altura máxima) e $r = 0.95$ (altura média). Nas métricas de dispersão, a variância e o desvio padrão obtiveram um valor de r abaixo dos 0.5 enquanto que para a amplitude verificou-se um valor de 0.93. Na densidade do copado, a densidade à altura mínima (2 metros) revelou a maior correlação ($r = 0.65$), a densidade do copado no percentil 95 obteve a menor correlação (0.38). A área das copas calculada acima dos 2 m (valor mínimo) obteve a maior correlação (0.59), enquanto que nos percentis 90 e 95 obtiveram-se valores com $r < 0.5$. Nas métricas relacionadas com o volume observou-se a correlação mais fraca, sendo que todas as métricas obtiveram um valor de $r < 0.5$, o volume acima da altura média revela a melhor correlação ($r = 0.49$).

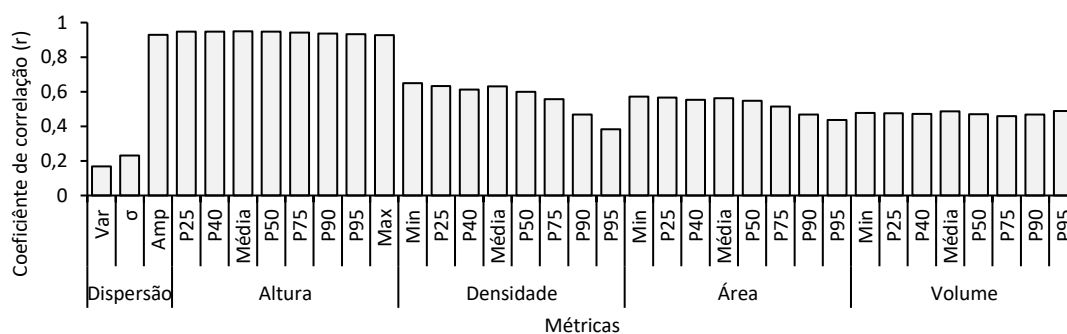


Figura 10. Correlação das diferentes métricas extraídas com a biomassa total para parcelas de pinheiro.

Nas parcelas de sobreiro, com a exceção da maioria das métricas de altura, todas as métricas revelaram uma correlação inferior a 0.5 (Figura 11). A altura no percentil 25 apresentou a maior correlação ($r = 0.76$), seguindo-se a altura no percentil 40 ($r = 0.72$) o percentil à altura máxima das parcelas revelou a menor correlação para este tipo de métricas ($r = 0.45$).

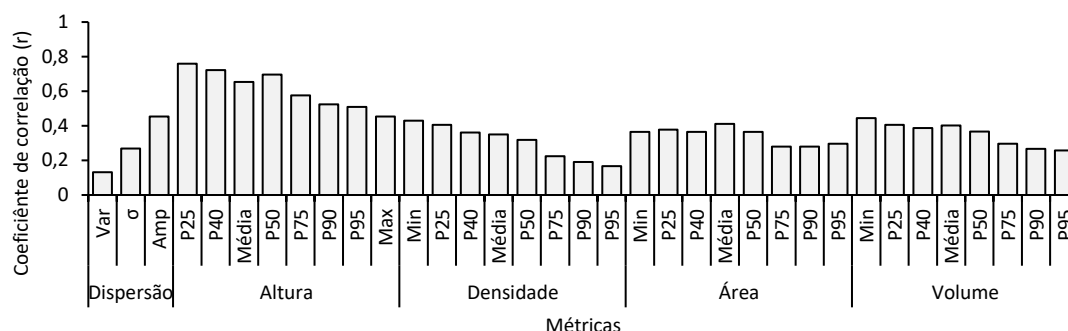


Figura 11. Correlação das diferentes métricas extraídas com a biomassa total para parcelas de sobreiro.

Visto que apenas existem quatro parcelas de sobreiro (Figura 12), não é possível aplicar uma metodologia robusta para determinação da biomassa total ao nível da parcela, ao contrário das restantes espécies. Assim, não é possível propor um modelo para a previsão de biomassa total ao nível da parcela. Contudo, os dados disponíveis demonstram que se poderia explorar a altura da parcela no percentil 25 pois é o indicador com maior correlação com os valores de biomassa total.

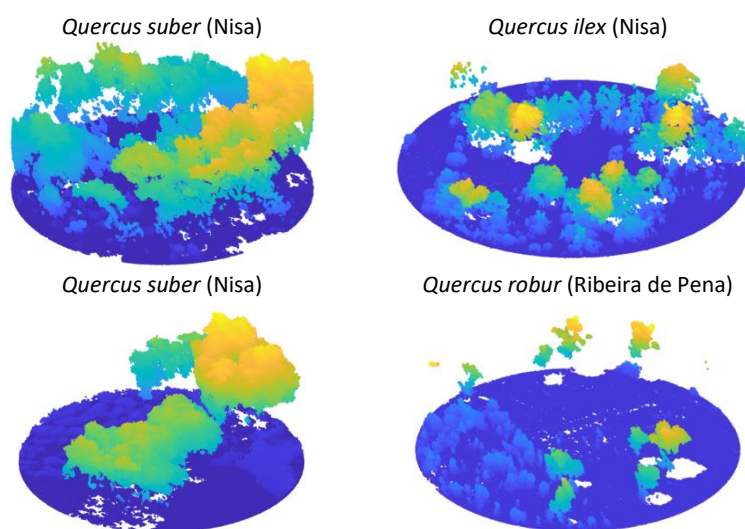


Figura 12. Nuvens de pontos das parcelas de sobreiro, após a aplicação da normalização da topografia.

Já nas parcelas arbustivas verificou-se uma correlação inferior a 0.5 para a maioria dos tipos de métricas, nomeadamente para a densidade, área e volume (Figura 13). A correlação mais elevada obtida para cada um deste tipo de métricas foi aquando da utilização da média. Assim a densidade da vegetação à altura média obteve 0.44, a área da vegetação na altura média foi de 0.41 e o volume à altura média de 0.43. Nas métricas de dispersão, apenas a amplitude da distribuição dos pontos obteve um valor de $r = 0.69$. Em todas as métricas de altura verificou-se um valor superior a 0.5, com

a menor correlação a ser observada para a altura ao percentil 95 ($r = 0.53$) e a mais elevada na altura ao percentil 25 ($r = 0.94$).

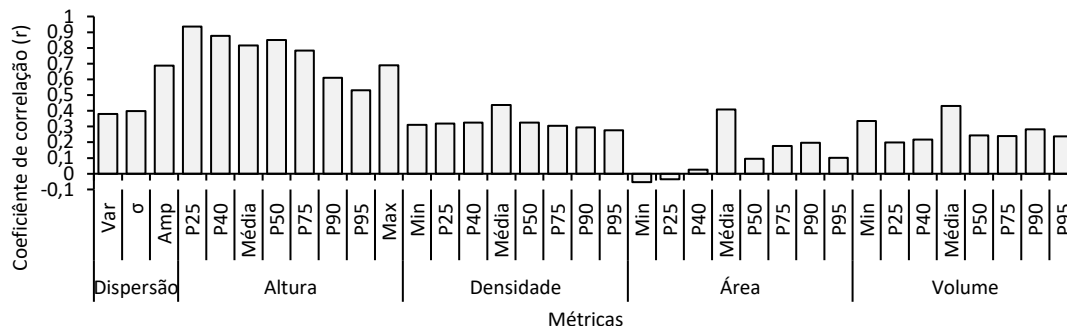


Figura 13. Correlação das diferentes métricas extraídas com a biomassa total para parcelas arbustivas.

3.3. Estimativa de biomassa total

O ajuste dos modelos de regressão da biomassa total foi realizado para a sua estimativa através das métricas extraídas a partir das nuvens de pontos das parcelas selecionadas para cada espécie. Para as parcelas de eucalipto e pinheiro, 30% das parcelas foram selecionadas aleatoriamente para teste dos modelos obtidos, possibilitando a aplicação dos modelos em dados que não foram utilizados para o treino/calibração dos modelos.

Os resultados obtidos durante o treino foram satisfatórios, verificando-se que a relação entre o modelo e a variável dependente é explicada com, pelo menos, 80% de acerto. As parcelas de eucalipto obtiveram o maior R^2 (0.87) com um RMSE de 9.49 t ha^{-1} e MAE de 7.55 t ha^{-1} . O treino do modelo para as parcelas arbustivas obteve um $R^2 = 0.86$, RMSE = 1.44 t ha^{-1} e MAE = 1.20 t ha^{-1} . Enquanto que para as parcelas de pinheiro obteve-se $R^2 = 0.80$, RMSE = 93.40 t ha^{-1} e MAE = 85.05 t ha^{-1} . O maior erro na estimativa da biomassa total está associado às parcelas de pinheiro. Nas próximas subsecções é apresentado mais detalhe.

3.3.1. Eucalipto

O modelo obtido para as parcelas de eucalipto através de regressão linear por *stepwise* é apresentado na equação (3). O modelo foi obtido através da utilização da amplitude da altura dos pontos acima de dois metros, a sua altura média, a área de ocupação do copado a dois metros e a densidade das copas à altura do percentil 90 (métricas com maior correlação em cada tipo, Figura 9). Após a aplicação da técnica de regressão obteve-se o resultado de que apenas a utilização da altura média consegue prever a biomassa total ao nível da parcela. O R^2 do melhor modelo foi de 0.89 tendo

um RMSE de 8.68 t ha⁻¹ e MAE de 6.76 t ha⁻¹. Assim, é possível apenas com a extração de um parâmetro, estimar a biomassa total de parcelas de eucalipto com um erro de aproximadamente 8 toneladas. Quando aplicado às parcelas de validação (n = 12), não utilizadas no processo de treino, a performance diminui, mas mantém-se satisfatória, com R² = 0.75, RMSE = 11.76 t ha⁻¹ e MAE = 9.77 t ha⁻¹. A implementação do modelo desenvolvido está demonstrada na Figura 14. Quando comparando o valor de biomassa previsto com a quantidade de biomassa estimada através do inventário florestal os valores estimados demonstram uma elevada correlação. Quando o modelo é aplicado a todas as parcelas de eucalipto selecionadas (parcelas usadas para treino e parcelas de validação) verifica-se um R² = 0.86, RMSE = 9.46 t ha⁻¹ e MAE = 7.60 t ha⁻¹.

$$Biomassa = A_{média}8.338 - 37.692 \quad (3)$$

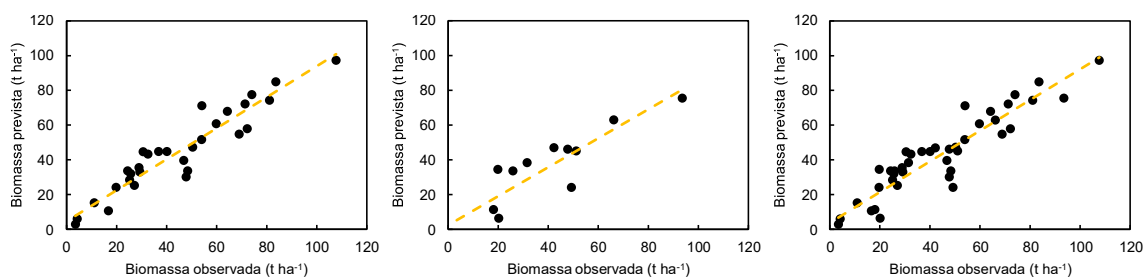


Figura 14. Correlação entre a biomassa observada e prevista para as parcelas de eucalipto utilizando as parcelas de treino (a), validação (b), e todas as parcelas (c).

3.3.2. Pinheiro

O modelo obtido para as parcelas de pinheiro é apresentado na equação (4). O modelo foi obtido através da utilização da amplitude da altura dos pontos acima de dois metros, altura média, área do copado e densidade a dois metros de altura. Da mesma forma que para as parcelas de eucalipto, apenas com a utilização da altura média consegue-se prever a biomassa total ao nível da parcela. O R² do modelo com melhor performance foi de 0.92 com um RMSE de 60.55 t ha⁻¹ e MAE de 48.79 t ha⁻¹. Os resultados da correlação da previsão do modelo desenvolvido quando comparado com os valores de biomassa total observada são apresentados na Figura 15, demonstrando uma boa correlação. A performance nas parcelas utilizadas para validação (n = 5) revelou bons resultados (R² = 0.90, RMSE = 69.26 t ha⁻¹ e MAE = 60.86 t ha⁻¹). Quando o modelo é aplicado a todas as parcelas disponíveis apresentou consistência nos resultados com um R² = 0.90, RMSE = 59.62 t ha⁻¹ e MAE =

52.82 t ha⁻¹. Ao contrário das parcelas de eucalipto, os erros de estimativa da biomassa total são mais elevados, variando entre as 50 e 70 t ha⁻¹.

$$Biomassa = A_{média}38.483 - 111.678 \quad (4)$$

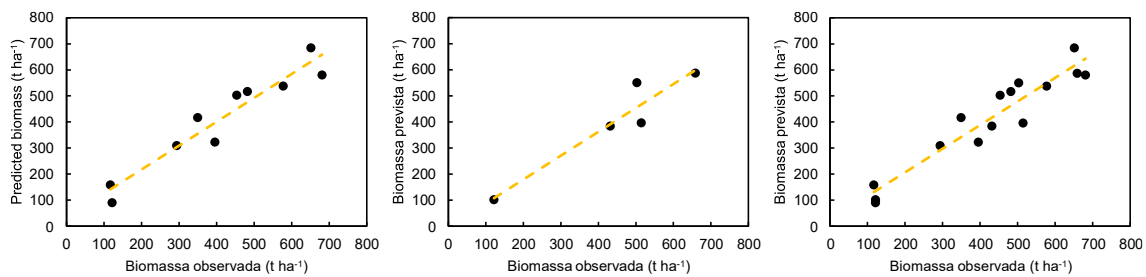


Figura 15. Correlação entre a biomassa observada e prevista para as parcelas de pinheiro utilizando as parcelas de treino (a), validação (b), e todas as parcelas (c).

O erro quantitativo mais elevado é, de certa forma, expectável devido também ao maior valor de biomassa total nas parcelas de pinheiro, em comparação com as de eucalipto (Tabela 1). Quando comparando o valor de RMSE utilizando todas as parcelas de eucalipto ou de pinheiro, a percentagem deste erro em torno da mediana da biomassa das parcelas é maior nas parcelas de eucalipto (24%) em comparação com as parcelas de pinheiro (13%).

3.3.3. Arbustivas

O modelo para a determinação da biomassa total em parcelas arbustivas teve a melhor performance quando utilizando-se a combinação da amplitude da altura dos pontos e a altura no percentil 25, como apresentado na equação (5). Assim, utilizando estas duas características extraídas das nuvens de pontos obteve-se um $R^2 = 0.88$ e um RMSE de 1.17 t ha⁻¹ e MAE = 0.92 t ha⁻¹ no modelo com melhor performance. Devido ao número limitado de parcelas selecionadas (n = 11) não foi possível testar o modelo em parcelas não utilizadas para o treino. Os resultados da correlação entre os valores previstos e observados são apresentados na Figure 16.

$$Biomassa = 2.24 - 2.15Amp + 51.5A_{p25} \quad (5)$$

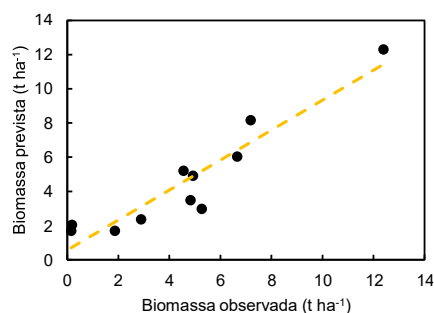


Figura 16. Correlação entre a biomassa observada e prevista para as parcelas arbustivas.

4. Conclusões e perspectivas de melhoria

O conteúdo apresentado demonstra a proposta e aplicação de uma metodologia para a o processamento de nuvens de pontos, obtidas por sensores LIDAR, extração de várias métricas e criação de modelos para determinação da biomassa total em parcelas arbustivas, de eucalipto e de pinheiro. As equações propostas facilitam a aplicação da metodologia de quantificação de biomassa total pois utilizam um número reduzido de parâmetros a serem extraídos de nuvens de pontos LIDAR. Todos os modelos revelaram uma boa performance nos dados disponíveis.

Apesar dos resultados obtidos serem satisfatórios estes carecem de uma maior exploração em vários aspetos. O aumento do número de parcelas e diversidade das áreas de estudo deve ser considerado, este aspeto tem relevante importância pois permitiria aumentar a robustez dos modelos, passando a existir mais parcelas que poderiam estar divididas por idade da plantação. O facto de apenas existirem quatro parcelas compostas por sobreiro impossibilitou o desenvolvimento do modelo que permita estimar a biomassa total para *Quercus spp.*, um maior número de parcelas poderia solucionar este aspeto. Uma maior amostragem de parcelas, permitiria ainda explorar outras abordagens, como o caso das técnicas de *machine learning*.

Outro aspeto a explorar recaí sobre a qualidade dos dados, por exemplo, o cálculo de biomassa em parcelas arbustivas revelou-se difícil devido à falta de geometria nas nuvens de pontos, tendo-se descartado grande parte das parcelas amostradas no terreno. Outros tipos de dados provenientes de deteção remota podem ser considerados para aferição da biomassa. Um exemplo é o caso da utilização de dados multiespectrais adquiridos por satélite ou por VANT, este tipo de dados permite obter informação na faixa do visível e do infravermelho próximo do espectro eletromagnético (400–1000 nm), permitindo o cálculo de índices de vegetação que diferem de acordo com a densidade e tipo de vegetação, podendo melhorar a robustez dos modelos para determinação da biomassa arbustiva. Outro aspeto a explorar é a aquisição simultânea de dados RGB e LIDAR (nuvens

de pontos com cor). A utilização de imagens aéreas de alta resolução, como RGB ou multiespectral, permitiria melhorar a caracterização das áreas em estudo, permitindo classificar diferentes espécies, aplicando-se diferentes modelos. Aliando a classificação espacial das espécies arbóreas a uma caracterização ao nível da árvore, seria possível estimar parâmetros dendrométricos por árvore, permitindo a diferenciação e criação de novos modelos para o cálculo da biomassa por árvore.

5. Referências bibliográficas

- Conti, Georgina, Lucas Damián Gorne, Sebastián Rodolfo Zeballos, Maria Lucrecia Lipoma, G Gatica, Esteban Kowaljow, Juan Ignacio Whitworth-Hulse, Anibal Cuchiatti, María Poca, and Sofía Pestoni. 2019. "Developing Allometric Models to Predict the Individual Aboveground Biomass of Shrubs Worldwide." *Global Ecology and Biogeography* 28 (7). Wiley Online Library: 961–975.
- Edelsbrunner, Herbert, and Ernst P. Mücke. 1994. "Three-Dimensional Alpha Shapes." *ACM Transactions on Graphics* 13 (1): 43–72. doi:10.1145/174462.156635.
- Faias, S, P Morais, S Dias, S Morão, R Salas, M Tomé, and P Ôchoa. 2007. "Uma Rede Europeia de Zonas Piloto Para Avaliação de Critérios e Indicadores de Gestão Florestal Sustentável—Relatório Final Do Projecto FORSEE." Lisboa. Retrieved from <https://www.repository.utl.pt/handle/10400.5/594>.
- Ma, Qin, Yanjun Su, and Qinghua Guo. 2017. "Comparison of Canopy Cover Estimations From Airborne LiDAR, Aerial Imagery, and Satellite Imagery." *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 10 (9): 4225–4236. doi:10.1109/JSTARS.2017.2711482.
- Pingel, Thomas J., Keith C. Clarke, and William A. McBride. 2013. "An Improved Simple Morphological Filter for the Terrain Classification of Airborne LIDAR Data." *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 77 (March): 21–30. doi:10.1016/j.isprsjprs.2012.12.002.
- Soares, Paula, and Margarida Tomé. 2004. "Analysis of the Effectiveness of Biomass Expansion Factors to Estimate Stand Biomass." *Modeling Forest Production*. Dept. Forest and Soil Sciences, BOKU Univ. Natural Resources and Applied ..., 368–374.
- Tomé, Margarida, Susana Barreiro, Joana Amaral Paulo, and Sónia Pacheco Faias. 2007. "Seleção de Equações Para Estimação de Variáveis Da Árvore Em Inventários Florestais a Realizar Em Portugal." Lisbon, Portugal: Instituto Superior de Agronomia-Centro de Estudos Florestais.