

Estimativa da biomassa para as espécies florestais *Quercus rotundifolia* e *Quercus suber* com base em imagens de satélite de alta resolução espacial

Adélia Maria Oliveira de Sousa^{1a}

José Rafael Marques da Silva^{1b}

Ana Cristina Gonçalves^{1c}

Paulo Alexandre Mesquita^d

¹Universidade de Évora, Departamento de Engenharia Rural, Escola de Ciências e Tecnologia, Apartado 94 - 7002-554 - Évora, Portugal
Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais Mediterrânicas,
Apartado 94, 7002-554 Évora, Portugal,
asousa@uevora.pt^a, jmsilva@uevora.pt^b, acag@uevora.pt^c, paulomesquita00@gmail.com^d

Abstract. The forest biomass has had a growing importance in the global economy, by applications in bioenergy, development of bioproducts and issues related to reducing emissions of greenhouse gases. Forest biomass is a global strategic reserve that must be inventoried and monitored. Current techniques for inventory and monitoring of biomass, through the realization of forest inventory, are usually time consuming and expensive. Considering these facts, it is urgent to develop reliable techniques, low costs, to obtain this kind of information. Considering this problem, in this study we applied new techniques for processing of high spatial resolution satellite images. We used the method of multi-resolution segmentation and object-oriented classification to obtain the area of Tree Canopy Horizontal Projection to the forest species under study. With field measurements was also obtained area of Tree Canopy Horizontal Projection and was calculated the forest biomass. The relation between the results of these two methods allowed developing inventory technique to *Quercus rotundifolia* and *Quercus suber* forest species considering the Cumulative Canopy Horizontal Projection, measured by high resolution satellite imagery, with a prediction error lower than 5 %. This study was performed considering pure plots, where there is only one forest specie, and mixed plots with both forest species.

Palavras-chave: Quickbird, multi-resolution segmentation, object-oriented classification, biomass, Quickbird, segmentação multi-resolução, classificação orientada a objecto, biomassa.

1. Introdução

O sector florestal e a sua gestão são de elevada importância à escala mundial, pela relevância das funções económicas, ambientais, sociais e culturais a ela associadas.

A floresta em Portugal ocupa 38% do território nacional, apresentando diferentes taxas de arborização nas várias regiões do País. Portugal à escala Europeia é um país especializado no sector florestal, com uma contribuição elevada para o Produto Interno Bruto.

A avaliação da evolução da área florestal, em Portugal, é efetuada através do Inventário Florestal Nacional (IFN), elaborado a nível nacional, com periodicidade de 10 anos. Os IFN são, normalmente, constituídos por duas partes; uma primeira de análise da fotografia aérea, com determinação da ocupação, e para as formações florestais da composição e do grau de coberto, e uma segunda, por amostragem, com medição e recolha de dados biométricos em parcelas de área conhecida. A primeira permite ainda a produção de cartografia de ocupação do solo e a segunda o cálculo da biomassa.

A procura de meios alternativos de energia surge como prioridade para alguns países, sendo a biomassa uma fonte de bioenergia muito importante. A avaliação deste potencial energético é de fundamental importância, tornando-se assim pertinente desenvolver métodos mais expeditos na sua quantificação e com uma boa relação custo-benefício.

No estudo aqui apresentado vem de encontro a esta temática, onde o objectivo é avaliar o potencial de imagens de satélite de alta resolução espacial na identificação de espécies

florestais e estimar a sua biomassa para as espécies dominantes na região Sul de Portugal (*Quercus suber* e *Quercus rotundifolia*).

2. Metodologia de trabalho

2.1 Área de estudo

A área de estudo localiza-se na região Sul de Portugal, designada por Alto Alentejo, com uma dimensão aproximada de 133 km² (Figura 1). A região caracteriza-se por relevo pouco acentuado, dominando a planície. O clima é mediterrâneo, com um período seco de cerca de 4 meses e com precipitação média anual de 550-650 mm, concentrando-se sobretudo nos meses de Inverno (Novembro a Fevereiro).

Na região Sul de Portugal, predomina o montado que é constituído por povoamentos abertos de *Quercus suber* e *Quercus rotundifolia* e em menor área surge o *Pinus pinaster*, *Pinus pinea* e *Eucaliptus globulus*, quer em formações puras quer em mistas.

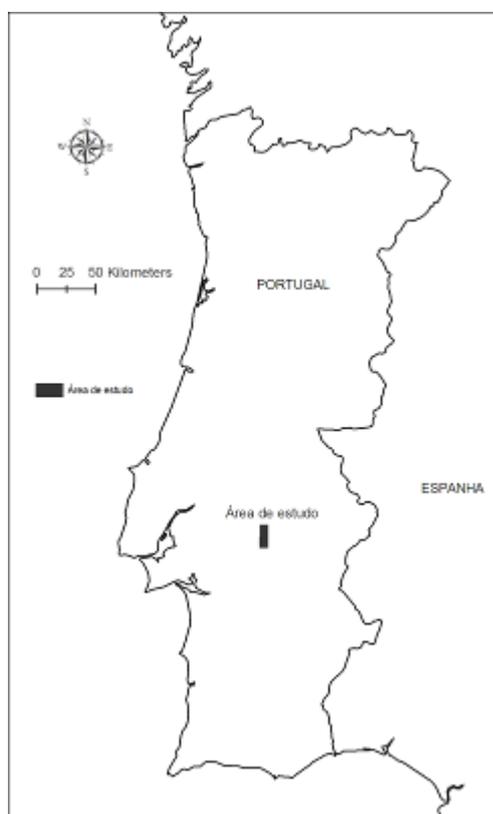


Figura 1. Área de estudo.

2.2 Dados

A imagem de satélite é do Quickbird da *Digital Globe*. A imagem foi adquirida no modo “*Pan-Sharpned*” correspondendo à fusão da banda pancromática com as 4 bandas espectrais, b1-azul (0.45-0.52 µm), b2-verde (0.52-0.60µm), b3-vermelho (V) (0.63-0.69µm) e b4-infravermelho próximo (IVP) (0.76-0.90µm), resultando as 4 bandas com uma resolução espacial de 0.70 metros e resolução radiométrica de 16 bits. A data de registo da imagem é de Agosto de 2006.

2.3 Métodos

2.3.1 Segmentação e classificação

Numa primeira fase procedeu-se à deteção e identificação das espécies florestais presentes na área em estudo através do método de segmentação multi-resolução e classificação orientada a objeto recorrendo ao programa de processamento de imagem, ENVI (versão 4.8) e *Definiens Developer* (versão 8.0.1).

No processo de segmentação multi-resolução foi utilizado o índice de vegetação *Normalized Difference Vegetation Index*, $NDVI = (IVP - V)/(IVP + V)$ (Tucker, 1979), que é um bom identificador da vegetação arbórea. Para a obtenção da máscara de vegetação, este índice é utilizado como banda adicional, com o objetivo de diminuir os problemas na discriminação da vegetação relativamente ao solo e arbustos de pequenas dimensões, resultantes da resolução espectral limitada do satélite Quickbird (KEY *et al.*, 2001). A Figura 2 ilustra a máscara de vegetação obtida para parte da área de estudo.

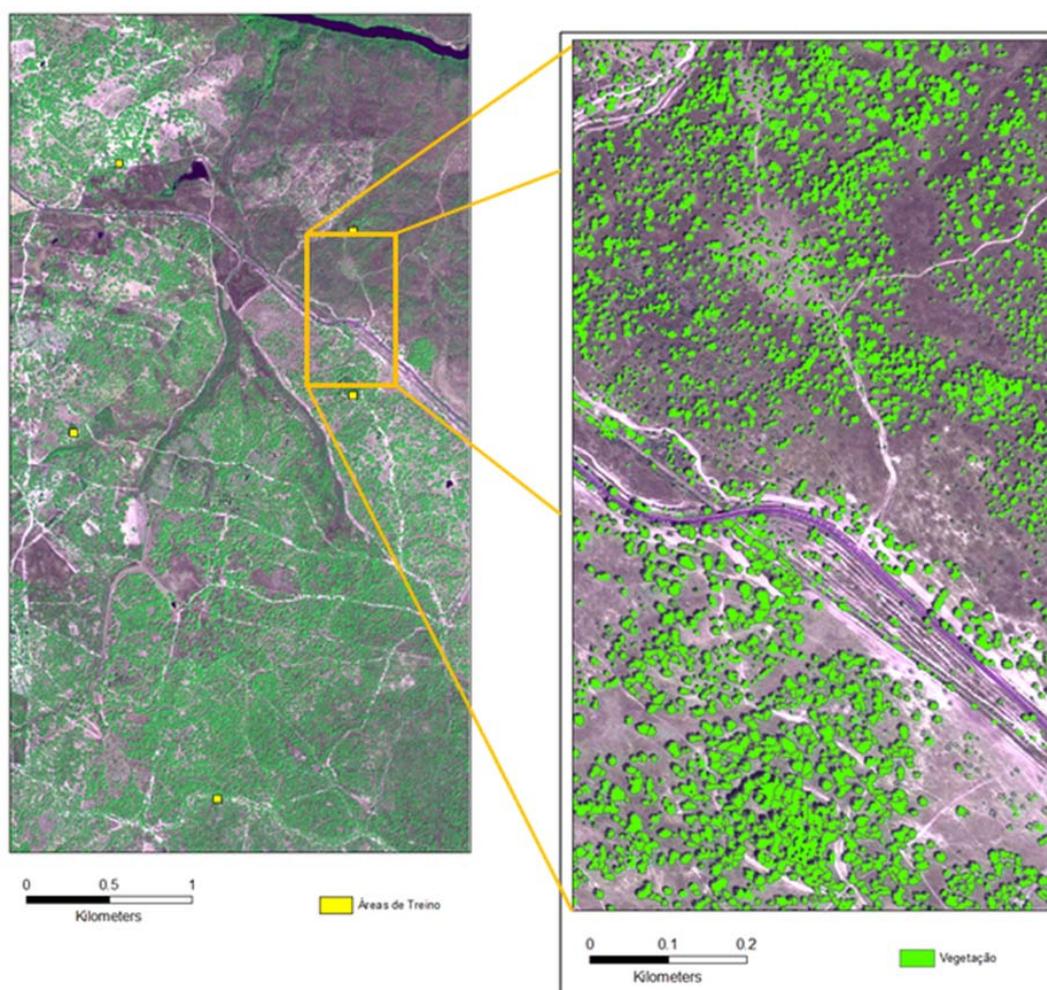


Figura 2. Imagem da área de estudo com ilustração da máscara de vegetação.

Em seguida realizou-se o processo de classificação digital da imagem, onde foi utilizado o algoritmo do vizinho mais próximo. Esta metodologia encontra-se descrita com mais pormenor em Sousa *et al.* (2010).

A Figura 3 ilustra o resultado da classificação de uma pequena área da imagem, nas duas espécies florestais dominantes na área, *Quercus suber* e *Quercus rotundifolia*.

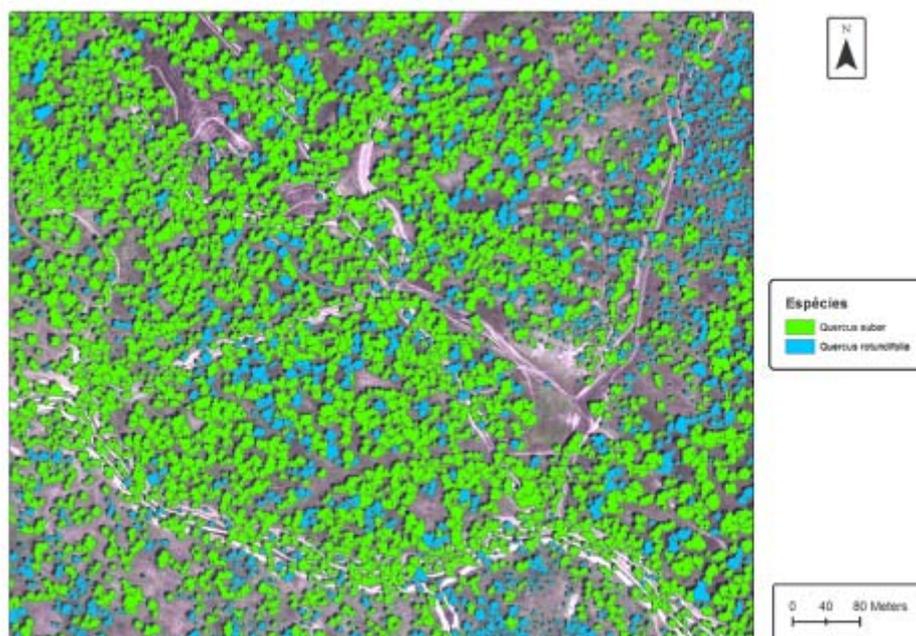


Figura 3. Ilustração do processo de classificação orientada a objeto para as duas espécies florestais em estudo numa pequena área da imagem.

Posteriormente foi delineada uma grelha de amostragem, em que cada parcela tem 2070.25 m². Foram selecionadas de forma aleatória 26 parcelas de amostragem com povoamentos puros, e mistos, sobre as quais foram realizadas medições dendométricas e para cada parcela ainda foi refinada a máscara de vegetação. Consequentemente foi realizada a classificação das espécies florestais presentes nas parcelas de amostragem (Figura 4).

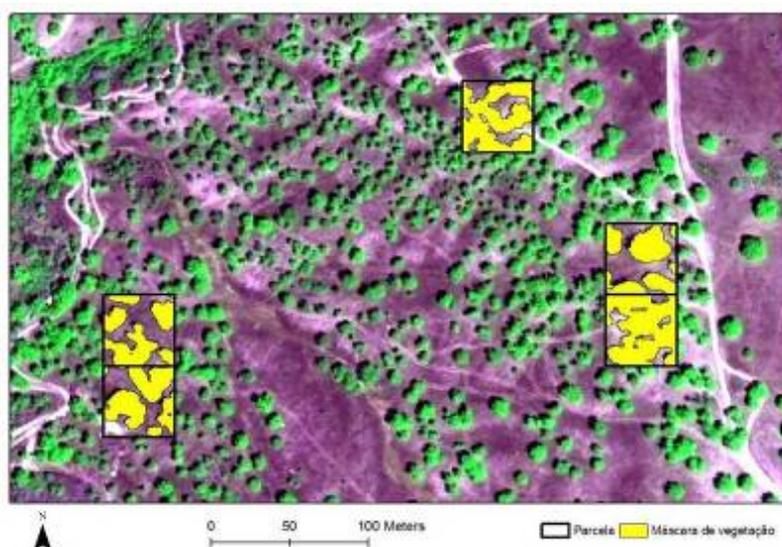


Figura 4. Ilustração de parcelas de inventário com a máscara de vegetação.

Com base na classificação da imagem de satélite procedeu-se à avaliação do grau de coberto, quantificando a área horizontal da projeção da copa para uma grelha.

Foi estimada a biomassa recorrendo a inventário florestal, nas parcelas selecionadas onde foram medidas as variáveis dendométricas para cada árvore individual com diâmetro à altura do peito superior a 20cm. As variáveis dendométricas realizadas foram: diâmetro à altura do

peito, altura total e o raio da copa em 4 raios (Norte, Sul, Este e Oeste) (Avery e Burkhart, 1994) e ainda foi registrada a localização de cada árvore com GPS.

A biomassa foi estimada com base nas funções alométricas de Paulo e Tomé (2006), indicadas a seguir:

$$ww = 0.164185 \times d^{2.011002} \quad (1)$$

$$wb = 0.600169 \times d^{1.355957} \quad (2)$$

$$wc = 1.909152 \times d^{1.200354} \quad (3)$$

$$\text{Biomassa} = ww + wb + wc \quad (4)$$

onde ww é a biomassa do lenho, wb da casca e wc da copa.

3. Resultados e Discussão

3.1 Estimativa da biomassa florestal com medições dendométricas

Com a base de dados resultante da realização do inventário e com os valores de biomassa, procedeu-se à análise comparativa entre os resultados de grau de coberto obtidos pela classificação de imagens de satélite e os dados do inventário.

A Tabela 1 apresenta as variáveis dendométricas medidas, bem como o cálculo da percentagem de coberto e o valor da biomassa para cada parcela.

Tabela 1. Parcelas de povoamentos puros de *Quercus rotundifolia* (QR) e *Quercus suber* (QS)

Parcela	Nha	Gha	PHC	PHC_S	Wtotal	%Coberto	Wha_kg
QR1 18	58	4.5	403.8	490.49	4143.9	20	20016.5
QR1 29	72	5.6	591.8	673.26	5249.4	29	25356.5
QR1 4	29	5.2	474.8	736.47	4189.7	23	20237.4
QR1 49	63	4.0	394.9	683.06	3880.6	19	18744.8
QR1 51	97	6.5	610.9	1029.98	6160.8	30	29758.8
QR1 66	63	4.3	342.8	835.94	4038.9	17	19509.1
QR2 18	101	9.4	702.9	776.16	8468.5	34	40905.7
QR2 19	101	7.8	695.3	465.99	7280.6	34	35167.6
QR2 22	116	11.1	765.4	522.34	9947.9	37	48051.8
QR2 35	72	6.7	799.5	1183.35	6041.4	39	29182.2
QR2 36	43	5.3	597.8	1214.22	4458.0	29	21533.7
QR2 37	58	7.3	559.4	1200.99	6079.6	27	29366.5
QR2 38	111	10.6	981.9	1276.94	9501.2	47	45894.1
QS1 17	63	6.8	674.3	1040.27	5920.2	33	28596.4
QS1 36	43	6.0	415.1	1269.59	4816.3	20	23264.2
QS1 37	39	4.6	483.3	1614.06	3921.2	23	18940.8
QS2 60	87	7.8	986.1	1370.04	7088.8	48	34241.1

Nha – número de árvores por hectare; **Gha**- área basal por hectare; **PHC** – área de projecção horizontal de copa por parcela (m²); **PHC_S** – área de projecção horizontal de copa avaliada na imagem de satélite (m²); **Wtotal** – biomassa total aérea por parcela; **%Coberto** – grau de coberto por parcela, corresponde ao somatório da projecção horizontal das copas considerando apenas um plano vertical (%); **Wha_kg** – biomassa por hectare.

3.2 Relação entre a área de projecção horizontal de copa e a sua respectiva biomassa para *Quercus rotundifolia* e *Quercus suber*

Com a área de projecção horizontal de copa (PHC) por parcela e por cada espécie obtida com base das imagens de satélite estabelecemos uma relação com a biomassa resultante do inventário florestal por parcela, do qual resultou uma função que nos permite estimar a biomassa existente.

Os dados foram analisados não parcela a parcela, mas sim foram considerados os parâmetros cumulativos das parcelas em termos de área de projeção horizontal de copa cumulativa obtida por satélite (PHCC_S) e biomassa cumulativa obtida com as funções alométricas (BC_A), obteve-se assim a relação indicada na Figura 5 para o *Quercus rotundifolia* e na Figura 6 para *Quercus suber*.

Na Figura 5 verificamos que a relação entre as duas variáveis para as respectivas espécies, têm um padrão linear. Se considerarmos uma relação linear entre as duas variáveis, a passar na origem, obtemos um declive da reta de 6.47 kg m^{-2} e um R^2 de 0.99, para o *Quercus rotundifolia* (Figura 5 a) e um declive da reta de 7.34 kg m^{-2} e um R^2 de 0.99, para o *Quercus suber* (Figura 5 b). Verificamos que para ambas as espécies florestais a partir dos 4000 m^2 de PHCC_S o erro de estimação da biomassa por satélite (EEB_S) centra-se entre os -5% e os $+5\%$, o que nos parece bastante aceitável considerando o facto de que muitos inventários florestais chegam a admitir erros até 25% , como erros aceitáveis.

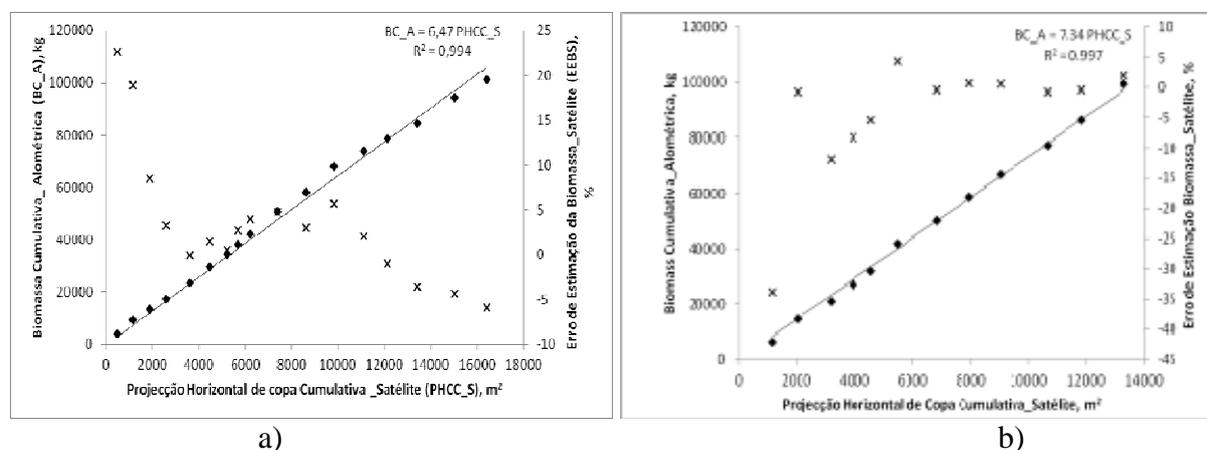


Figura 5. Relação entre a BC_A e a PHCC_S, a) *Quercus rotundifolia* e b) *Quercus suber*.

Apesar de existirem muitos povoamentos puros de *Quercus rotundifolia* e de *Quercus suber*, estes encontram-se muitas vezes em povoamentos mistos de ambas as espécies, assim, seria importante perceber se do ponto de vista da parcela mista poderíamos também estimar a biomassa existente considerando o já estudado para os povoamentos puros. Para efetuar esta análise foram utilizadas as parcelas descritas na Tabela 2.

Na Figura 6 pode-se observar a relação entre os valores de área cumulativa por parcela, a PHCC_S e BC_A. Se da mesma forma, como fizemos para as parcelas puras, considerarmos uma relação linear entre estas duas variáveis, a passar na origem, obtemos um declive da reta de 7.80 kg m^{-2} e um R^2 de 0.98. No entanto e ao contrário dos valores encontrados anteriormente, neste caso, só a partir dos 8000 m^2 de PHCC_S o erro de estimativa da biomassa cumulativa (EEB_S) centra-se entre os -5% e os $+5\%$.

Face à maior variabilidade dos dados, pois misturamos duas espécies, muitas vezes com proporções distintas, parece ser necessário uma maior área PHCC_S para que os erros se estabilizem à volta dos 5% , no entanto os valores de biomassa por unidade de área mantêm alguma semelhança.

Tabela 2. Caracterização das parcelas mistas, *Quercus rotundifolia* e *Quercus suber*.

Parcela	Nha	Gha	PHC	PHC_S	WAz	WSb	Wtotal	%coberto	Wha_kg
Az1 38	92	8.1	458.0	924.14	3933.4	3356.6	7290.0	22	35213.3
Az1 57	63	5.1	310.6	478.73	2120.1	2554.7	4674.8	15	22581.1
Az1 59	72	6.2	375.1	974.12	3985.7	1623.1	5608.8	18	27092.5
Sb1 52	19	2.6	181.1	423.85	772.2	1391.2	2163.3	9	10449.6
Az1 63	116	8.2	522.7	543.41	2392.7	5253.3	7646.0	25	36932.9
Sb1 1	48	6.2	395.9	618.87	1217.1	3991.8	5208.9	19	25160.5
Sb1 2	43	6.3	298.5	609.07	532.0	4741.2	5273.1	14	25471.0
Sb1 23	82	13.1	615.2	1005.48	5038.0	5624.9	10663.0	30	51505.7
Sb1 3	53	6.5	302.0	552.72	395.5	5187.6	5583.2	15	26968.5
Sb1 39	43	4.4	400.1	614.95	740.5	3112.1	3852.6	19	18609.4
Sb1 44	68	7.9	391.5	870.73	354.0	6456.0	6810.0	19	32894.8
Sb1 49	34	5.4	369.4	597.31	733.5	3715.8	4449.2	18	21491.3
Sb1 50	48	7.2	442.3	1010.38	401.6	5542.3	5943.9	21	28710.8
Az1 25	77	4.9	526.7	631.12	4034.2	675.8	4710.0	25	22751.1
Sb1 54	39	5.5	577.7	815.85	3979.2	647.9	4627.0	28	22350.0
Az1 42	39	3.5	386.2	617.89	2916.4	277.2	3193.6	19	15426.2
Az1 53	43	4.7	316.5	529.69	3117.7	1005.1	4122.8	15	19914.5
Az1 54	43	4.2	318.1	570.85	3367.9	342.6	3710.5	15	17923.0
Az1 62	48	6.3	360.3	668.85	4200.8	937.6	5138.4	17	24820.0
Az1 65	43	6.2	313.2	1028.51	4467.1	733.5	5200.6	15	25120.7
Az1 67	53	4.5	420.8	610.54	3678.6	432.7	4111.2	20	19858.7
Az2 27	140	7.1	638.0	1224.51	6881.4	227.3	7108.7	31	34337.2

Nha – número de árvores por hectare; **Gha**- área basal por hectare; **PHC** – área de projecção horizontal de copa por parcela (m²); **PHC_S** – área de projecção horizontal de copa avaliada na imagem de satélite (m²); **Wtotal** – biomassa total aérea por parcela; **%Coberto** – grau de coberto por parcela, corresponde ao somatório da projecção horizontal das copas considerando apenas um plano vertical (%); **Wha_kg** – biomassa por hectare.

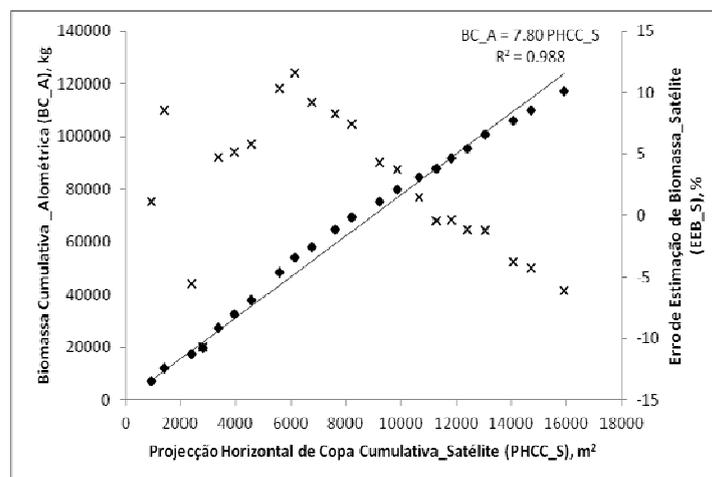


Figura 6. Relação entre a BC_A e a PHCC_S para parcelas mistas de *Quercus rotundifolia* e *Quercus suber*.

Considerando o anteriormente exposto poderemos dizer que é possível estimar a biomassa das espécies florestais *Quercus rotundifolia* e *Quercus suber* a partir da projecção horizontal de copa cumulativa obtida com base nas imagens de satélite. A razão de ser do valor cumulativo prende-se com o facto de existir uma variabilidade elevada no fenómeno em estudo quando visto do ponto de vista unitário, no entanto, tal variabilidade, é compensada positiva e negativamente quando é calculada de uma forma cumulativa. Esta metodologia de estimação da biomassa atinge erros inferiores a 5% se considerarmos os valores cumulativos de projecção horizontal de copa superiores a 4000 m², quer medidos em campo, quer medidos por intermédio de imagem de satélite de alta resolução. Através das equações 5 e 6 e da

Tabela 3 poderemos então estimar a biomassa cumulativa (BC_A), podendo nós concluir que para valores de PHCC superiores a 4000 m² e medidos no campo poderemos ter como referência uma relação proporcional entre biomassa e projeção horizontal de copa cumulativa de aproximadamente 10 kg m⁻². Para a PHCC_S e considerando a metodologia apresentada anteriormente a relação de proporcionalidade ronda os 6.5 kg m⁻². Considerando estas premissas é pois possível inventariar a biomassa florestal da espécie *Quercus rotundifolia* e *Quercus suber*, a partir de imagens de satélite de alta resolução, com erros inferiores a 5%.

$$BC_A = b * PHCC \quad (5)$$

$$BC_A = c * PHCC_S \quad (6)$$

Tabela 3. Parâmetros de estimação de biomassa para *Quercus rotundifolia* e *Quercus suber* por parcela.

Povoamento	Equação	a, b, c (kg m ⁻²)	Válido para	Observações
Puro	5	9.87	PHCC > 4000 m ²	Com a PHCC
<i>Quercus rotundifolia</i>	6	6.47	PHCC_S > 4000 m ²	Com a PHCC_S
Puro	5	13.94	PHCC > 4000 m ²	Com a PHCC
<i>Quercus suber</i>	6	7.34	PHCCP_S > 4000 m ²	Com a PHCC_S
Misto	5	13.74	PHCC > 5000 m ²	Com a PHCC
<i>Quercus rotundifolia</i> / <i>Quercus suber</i>	6	7.80	PHCCP_S > 8000 m ²	Com a PHCC_S

4. Conclusões

Neste estudo desenvolveu-se uma metodologia para a estimação da biomassa com base em imagens de satélite de alta resolução espacial com resultados bastante satisfatórios, com erros de estimação inferiores a 5%. Para parcelas puras de *Quercus rotundifolia* e *Quercus suber* pode-se estimar o valor da biomassa desde que a projeção horizontal de copa cumulativa obtida com base em imagens de satélite tenha valores superiores a 4000 m². Para povoamentos mistos de ambas as espécies, a estimação da biomassa, com um erro de 5% é conseguido para valores projeção horizontal de copa cumulativa obtida com base em imagens de satélite superiores a 8000 m².

Agradecimentos

Agradecemos ao Programa Operativo de Cooperação Transfronteiriço Espanha - Portugal (POCTEP), que financiou o projecto Altercexa - Medidas de Adaptación y Mitigación del Cambio Climático a Través del Impulso de las Energías Alternativas en Centro, Alentejo y Extremadura, no âmbito do qual este estudo foi desenvolvido. (Ref^a 0317_Altercexa_4_E).

Referências Bibliográficas

Avery, T.E.; Burkhardt, H.E. Measurements, 4ª Edição. Macgraw-Hill Inc., New York. 1994. 408 p.

Key, T.; Warner, T.A.; McGraw, J.B.; Fajvan, M.A. A comparison of multispectral and multitemporal information in high spatial resolution imagery for classification of individual tree species in a temperate hardwood forest. Remote Sensing of Environment, v. 75, n. 1, p. 100-112, 2001.

Sousa, A.M.O.; Mesquita, P.; Gonçalves, A.C.; Marques da Silva, J.R. Segmentação e classificação de tipologias florestais a partir de imagens Quickbird. Ambiência, n. 6 (Ed. Especial), p. 57 – 66, 2010.

Tucker. C. J. Red and photographic infra-red linear combinations for monitoring vegetation. Remote Sensing of Environment, v. 8, n. 2, p. 127-150, 1979.