

Predição da Biomassa Aérea da *Pinus pinaster* Aiton por um Sistema de Equações Aditivas Integrado no Simulador *Open Source ModisPinaster*

***Helder Viana, **Carlos Pacheco Marques e ***Teresa Fonseca**

Sumário. Neste estudo foram estabelecidos modelos para estimar a biomassa aérea de pinheiro-bravo (*Pinus pinaster* Aiton.) considerando as componentes individuais, tronco, casca, bicada, ramos e agulhas. De forma a garantir a aditividade entre as componentes de biomassa, foi ajustado um sistema de equações de regressão aparentemente não relacionadas (SUR). Recorrendo ao método destrutivo foram medidas e pesadas 77 árvores, recolhidas em 16 povoamentos florestais na região Norte-Centro de Portugal. As componentes de biomassa das árvores foram separadas e pesadas individualmente e, após determinação da fração de humidade, foi determinado o seu peso seco. Das variáveis biométricas medidas, o diâmetro à altura do peito e a altura total da árvore foram as que melhor se correlacionaram com a biomassa das componentes consideradas e, por isso, utilizadas em todas as equações incluídas no sistema ajustado. As estatísticas da regressão, coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}) e valor percentual do desvio padrão dos resíduos (s_{yx}), mostraram uma boa qualidade de ajustamento para a estimação da biomassa aérea total ($R^2_{aj}=0.986$, $s_{yx}=13.7\%$). A menor capacidade preditiva foi observada nas equações respeitantes às componentes bicada ($R^2_{aj}=0.71$, $s_{yx}=22.3\%$) e ramos ($R^2_{aj}=0.79$, $s_{yx}=51.1\%$). A comparação com equações disponíveis na bibliografia, para a mesma espécie, confirmou que os novos modelos de biomassa conduzem a estimativas mais exatas nos

*Professor Adjunto

CI&DETS, Escola Superior Agrária, Instituto Politécnico de Viseu. Quinta da Alagoa-Ranhados, 3500-606 Viseu. CITAB, UTAD. Apartado 1014, 5001-801 VILA REAL

**Professor Catedrático

CIFAP, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro. Apartado 1013, 5001-801 VILA REAL

***Professora Auxiliar

CIFAP, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro. Apartado 1013, 5001-801 VILA REAL

1º Autor E-mail: hviana@esav.ipv.pt

povoamentos estudados. Finalmente, o sistema de equações desenvolvido foi integrado no modelo de crescimento e produção ModisPinaster. Esta ferramenta *open source*, disponível na plataforma Capsis (http://www.inra.fr/capsis/help_en/modispinaster) permite, entre outras funcionalidades, a estimativa da biomassa aérea em pinhal bravo, de acordo com diferentes cenários de gestão escolhidos pelo utilizador.

Palavras-chave: Biomassa, Pinheiro-bravo, Regressão por equações aparentemente não relacionadas (SUR), ModisPinaster

Prediction of Aboveground Biomass of *Pinus pinaster* Aiton Using a System of Integrated Additive Equations from the Open Source ModisPinaster Simulator

Abstract. This study presents a system of allometric equations to estimate the aboveground biomass (AGB) components (stem wood, stem bark, branches, top and needles) of maritime pine (*Pinus pinaster* Aiton.). In order to assure the additivity properties among the components of tree biomass and total tree biomass, a nonlinear regression equations system was developed by Seemingly Unrelated Regression (SUR) procedures. The data was collected, by destructive sampling, in 77 trees within 16 forest stands, located in the North-Centre of Portugal. The trees components were separated, individually weighed and, after determination of the moisture content, the biomass dry weight was determined. The biomass of individual components was modelled as a function of the diameter at breast height and total tree height. The goodness of fit (R^2_{adj}) and the percentage root mean square error (RMSE) indicates the good predictive ability to estimate the total AGB biomass ($R^2_{ad} = 0.986$, RMSE = 13.7%). The lowest predictive ability was observed in top and branches components ($R^2_{ad} = 0.71$, RMSE = 22.3%; and $R^2_{ad} = 0.79$, RMSE = 51.1%, respectively). The comparison with previous equations, for the same species, showed that the new models achieve more accurate estimates in the stands studied. Finally, the system of equations was included in the *open source* simulator ModisPinaster, available in the Capsis platform (http://www.inra.fr/capsis/help_en/modispinaster), allowing the estimation of maritime pine AGB, under different management scenarios chosen by the user.

Keywords: Biomass, maritime pine, Seemingly Unrelated Regression, ModisPinaster

1 - Introdução

A recolha de informações sobre as existências florestais dos ecossistemas terrestres é feita, recorrentemente, por inventários florestais tradicionais. O interesse destas avaliações centrava-se, primordialmente, na obtenção do volume mercantil da madeira com interesse para a indústria. Contudo, a importância de estudar a produtividade das florestas, em avaliar os recursos florestais para produção de energia, ou estudar o contributo das florestas no ciclo global do carbono, requer que os inventários disponibilizem informação cada vez mais detalhada e com maior rigor.

No seguimento da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Alterações Climáticas (UNITED NATIONS, 1992), e do posterior protocolo de Kyoto, ratificado em 1997 (UNITED NATIONS, 1998), os países membros devem reportar as emissões de Gases com Efeitos de Estufa (GEE), com particular relevo para o dióxido de carbono (CO₂). Aqui, as florestas têm uma importância central, uma vez que retêm cerca de 60% do carbono (650 Gt) armazenado pela vegetação terrestre (FAO, 2010), grande parte na sua biomassa (286 Gt). O carbono capturado nos ecossistemas florestais pode ser calculado, indiretamente, pela quantidade de carbono armazenado na biomassa. A diferença entre a quantidade de carbono armazenado na biomassa, obtida em dois inventários consecutivos, num dado intervalo de tempo, é usada para calcular a variação de carbono anual. As estimativas do carbono anual são, posteriormente, convertida em emissões de CO₂. Este método é recomendado nas Normas do IPCC - Painel Intergovernamental sobre Alterações Climáticas (IPCC, 2006), para estimar e reportar os Inventários Nacionais de GEE, decorrentes da Agricultura, Floresta e Outros Usos do Solo.

De forma a obter estimativas fiáveis do carbono armazenado e emissões de CO₂, é necessário conhecer a biomassa correta, por unidade de área, e a fração de carbono (%) média na biomassa de cada planta ou, preferencialmente, em cada componente individualmente (fuste, casca, ramos, folhas, etc). Assim, numa primeira etapa, são necessárias equações de biomassa, específicas para cada espécie, que estimem com o maior rigor a biomassa aérea total, em diferentes componentes da árvore. Uma vez que, cada vez mais, a biomassa florestal é utilizada para a produção energética (VIANA *et al.*, 2010), a biomassa das componentes da planta pode ser também convertida em energia, utilizando os poderes caloríficos da biomassa específicos para cada espécie (VIANA, 2012).

Atendendo ao facto do pinheiro bravo (*Pinus pinaster* Aiton.) ser uma das espécies florestais com maior expansão no País, atualmente com cerca de 714

mil hectares, de acordo com os resultados preliminares do 6º Inventário Florestal Nacional (ICNF, 2013), contribuindo como importante fonte e sumidouro de carbono, ser uma das espécies mais importantes para indústria, bem como, a par do eucalipto, ser uma espécie cuja exploração intensiva permite a utilização regular da biomassa florestal residual para produção de energia, este trabalho teve como objetivos:

1) Desenvolver um sistema de equações de regressão não-lineares, derivadas por ajustamento simultâneo, para a estimativa da biomassa das componentes individuais de tronco, da casca, da bicada, dos ramos e das agulhas.

2) Integrar o sistema de equações desenvolvido na ferramenta de simulação de crescimento e produção ModisPinaster, de forma a promover a implementação de uma gestão florestal sustentável.

2 - Material e métodos

2.1 - Modelação do sistema de equações de regressão não lineares ajustados simultaneamente

2.1.1 - Dados utilizados no ajustamento

Os dados utilizados no ajustamento simultâneo do sistema de equações de regressão não lineares são provenientes de 16 povoamentos de pinheiro-bravo localizados na região centro de Portugal. Em cada povoamento foi selecionado um conjunto de árvores representantes de todas as classes de diâmetro do povoamento, perfazendo um total de 77. Após o abate, a biomassa verde foi pesada (kg arv^{-1}) no local, e foi recolhida uma subamostra de cada componente (fuste, casca, ramos, bicada e acículas), para enviar para laboratório, de forma a determinar o peso seco e calcular a fração de cada componente da árvore (kg seco arv^{-1}).

2.1.2 - Seleção de modelos para ajustamento simultâneo

De forma a selecionar os melhores modelos de biomassa, para cada componente, a incluir no sistema aditivo de equações de regressão, foram testados diversos modelos de regressão não lineares (e.g. SCHUMACHER e HALL, 1933; SPURR, 1952; TAKATA, 1958; CURTIS, 1967; HONER, 1967; OGAYA, 1968; FREIRE *et al.*, 2003; HUSCH *et al.*, 2003; ZIANIS *et al.*, 2005) pelo algoritmo Gauss-Newton, utilizando o procedimento NLIN do SAS 9.x. (SAS INSTITUTE INC., 2004).

Para a avaliação dos modelos foram calculados os resíduos (ei) das estimativas para cada equação, isto é, a diferença entre os valores de biomassa observados e os estimados, analisada a sua dispersão gráfica e comparadas as estatísticas do ajustamento, coeficiente de determinação (pseudo- R^2), coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}), erro-padrão da estimativa (s_{yx}), valor percentual do desvio padrão dos resíduos ($s_{yx}\%$), e calculado o AIC (Akaike information criterion) (AKAIKE, 1974) para seleção do melhor modelo. De forma a ultrapassar a violação do pressuposto de homogeneidade da variância do erro, observada nos modelos, foram calculados os pesos para ponderação de cada regressão de acordo com (PARRESOL, 1999, 2001).

2.1.3 - Ajustamento simultâneo do sistema de equações aparentemente não relacionadas (SUR)

De forma a garantir a aditividade das componentes de biomassa da árvore, alguns autores (e.g. CUNIA e BRIGGS, 1985; REED e GREEN, 1985; PARRESOL, 1999) sugerem a estimação simultânea por um sistema de equações. Desta forma, o ajustamento foi feito pelo método de equações aparentemente não relacionadas (SUR - *Seemingly Unrelated Regression*) seguindo (PARRESOL, 1999, 2001), aplicando o procedimento MODEL do SAS 9.x (ITSUR), com a seguinte especificação:

$$\begin{aligned}
 W_{wood} &= f_1(x_{1j}, \beta_{1j}) + \varepsilon_1 \\
 W_{bark} &= f_2(x_{2j}, \beta_{2j}) + \varepsilon_2 \\
 W_{top} &= f_3(x_{3j}, \beta_{3j}) + \varepsilon_3 \\
 W_{branches} &= f_4(x_{4j}, \beta_{4j}) + \varepsilon_4 \\
 W_{needles} &= f_5(x_{5j}, \beta_{5j}) + \varepsilon_5 \\
 W_{total} &= f_6(x_{1j}, x_{2j}, x_{3j}, x_{4j}, x_{5j}, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5) + \varepsilon_{total}
 \end{aligned} \tag{1}$$

Onde: W é a biomassa de cada componente da árvore (kg arv^{-1}), em função ($f_1, \dots, f_6$) das variáveis ($X_{1j}, \dots, X_{6j}$) e dos parâmetros ($\beta_{1j}, \dots, \beta_{6j}$) e ($\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_6$) é a componente do erro.

2.2 - O simulador de crescimento e produção ModisPinaster

O simulador de crescimento e produção ModisPinaster é uma ferramenta de apoio à Gestão Florestal Sustentável, originalmente desenvolvida por FONSECA (2004), que está disponível para utilização gratuita na plataforma Capsis (http://www.inra.fr/capsis/help_en/modispinaster). A descrição do modelo pode ser vista, detalhadamente em FONSECA *et al.* (2012a). A última versão do modelo (FONSECA *et al.*, 2012b) inclui o sistema de equações de regressão ajustadas simultaneamente, oferecendo a possibilidade complementar de quantificar a biomassa das componentes individuais de pinheiro bravo.

3 - Resultados

3.1 - Resultados do ajustamento

Na Tabela 1 apresenta-se o sistema de equações ajustado pelo método SUR, os coeficientes estimados, bem como as estatísticas obtidas na fase de ajustamento.

Tabela 1 – Sistema de equações ajustado, coeficientes dos modelos de regressão e estatísticas do ajustamento

Modelo	Parâmetro	Coefficientes	s _{yx} (%)	R ²	R ² _{aj}
$W_{fuste} = \exp [\beta_{10} + \beta_{11}(\ln d) + \beta_{12}h]$	β_{10}	-2.51510	14.7	0.9857	0.9856
	β_{11}	2.02707			
	β_{12}	0.05050			
$W_{casca} = \frac{d^2}{\beta_{20} + \beta_{21}h^{-1}}$	β_{20}	11.07610	24.0	0.9449	0.9449
	β_{21}	196.9906			
	β_{31}	0.75410			
$W_{bicada} = \beta_{31} \exp [\beta_{32}d^{-1} + \beta_{33}h^{-1}]$	β_{32}	16.81587	22.3	0.7132	0.7113
	β_{33}	-6.46652			
	β_{41}	0.09558			
$W_{ramos} = \beta_{41}d^{\beta_{42}}h^{\beta_{43}}$	β_{42}	2.65915	51.1	0.7883	0.7869
	β_{43}	-1.11584			
	β_{51}	0.12551			
$W_{agulhas} = \beta_{51}d^{\beta_{52}}h^{\beta_{53}}$	β_{52}	2.15321	45.3	0.8039	0.8026
	β_{53}	-0.74649			
$W_{AGB} = W_{fuste} + W_{casca} + W_{bicada} + W_{ramos} + W_{agulhas}$			13.7	0.9868	0.9857

Como se observa na Tabela 1, as estatísticas do ajustamento (mostraram uma boa qualidade preditiva da biomassa aérea total ($R^2_{aj}=0.986$, $s_{yx}=13.7\%$). A menor capacidade preditiva foi observada nas equações respeitantes às componentes bicada ($R^2_{aj}=0.71$, $s_{yx}=22.3\%$) e ramos ($R^2_{aj}=0.79$, $s_{yx}=51.1\%$), que se explica pela maior heterogeneidade destas componentes, e consequente menor correlação, com os regressores d e h utilizados no ajustamento. A comparação com equações disponíveis na bibliografia, para a mesma espécie, confirmou que os novos modelos de biomassa conduzem a estimativas mais exatas nos povoamentos estudados.

3.2 - Integração do sistema de equações aditivas no simulador ModisPinaster

O sistema de equações desenvolvido foi integrado no modelo de crescimento e produção ModisPinaster. Desta forma, a acrescentar às funcionalidades de modelação do crescimento e produção de povoamentos de pinheiro bravo, fica disponível mais uma funcionalidade para estimar a biomassa aérea da espécie, por componentes e total, de acordo com diferentes cenários de gestão escolhidos pelo utilizador. Adicionalmente, o utilizador tem a possibilidade de converter os valores de biomassa em estimativas de carbono armazenado ou de energia contida na biomassa (Figura 1), fazendo uso, neste caso, dos poderes caloríficos da biomassa específicos para a espécie, indicados por (VIANA, 2012).

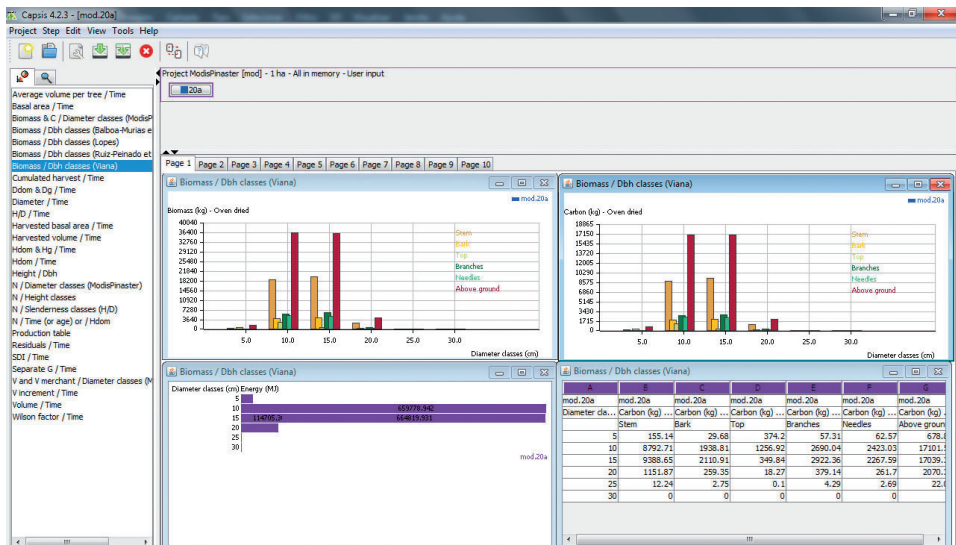


Figura 1 – Simulador ModisPinaster com indicação das estimativas de biomassa desagregada por componentes e por classe de diâmetro, para um povoamento com 20 anos.

4 - Conclusões

O sistema de equações para estimar a biomassa das componentes de pinheiro bravo, ajustado simultaneamente, apresenta resultados satisfatórios. A aplicação do método SUR garante as propriedades de aditividade entre as componentes da biomassa e a biomassa total. As avaliações por este método são mais eficientes, havendo um ganho no rigor das estimativas. Estes modelos foram comparados com outros, derivados por outros autores, noutras regiões, mostrando uma dispersão significativa entre as estimativas. Assim, a aplicação de modelos, ajustados numa região particular, não deve ser feita de forma universalizada noutras regiões distintas, uma vez que podem originar estimativas com elevado erro. Os modelos apresentados devem, pois, ser utilizados em povoamentos com características semelhantes (região Centro do País) aos que deram origem ao ajustamento dos mesmos. O ModisPinaster permitindo uma utilização dinâmica, possibilita a comparação de resultados com outros modelos de biomassa inseridos no simulador, podendo o utilizador decidir o mais adequado à situação de interesse. A generalização dos dados de saída a estimativas de energia contida na biomassa bem como à quantidade de carbono armazenada nas diversas componentes das árvores, permite flexibilizar as simulações de gestão, permitindo ensaiar novas opções de modelos de silvicultura (e.g. produção de biomassa para energia, sequestro de carbono) além dos tradicionalmente seguidos, muito afetos à produção de madeira.

Agradecimentos

Parte do trabalho realizado teve suporte da Ação COST: Development and harmonisation of new operational research and assessment procedures for sustainable forest biomass supply, através da bolsa COST-STSM-ECOST-STSM-FP0902-151012-023494 usufruída por T. Fonseca em outubro de 2012. A autora agradece ao Eng. François de Coligny (AMAP-INRA) o apoio prestado na incorporação das equações de biomassa no ModisPinaster.

Referências bibliográficas

- AKAIKE, H., 1974. A new look at the statistical model identification. *Automatic Control*, IEEE Transactions on 19, 716-723.
- CUNIA, T., BRIGGS, R.D., 1985. Forcing additivity of biomass tables-use of the generalized least-square method. *Canadian Journal of Forest Research* 15, 23-28.
- CURTIS, R.O., 1967. Height-Diameter and Height-Diameter-Age Equations For Second-Growth Douglas-Fir. *Forest Science* 13, 365-375.
- FAO, 2010. *Global Forest Resources Assessment 2010. Main report*. FORESTRY PAPER 163. Food and Agriculture Organization of the United Nations, pp. 343. Available online at: <http://www.fao.org/docrep/013/i1757e/i1757e.pdf>, (Accessed April 2013).
- FONSECA, T., 2004. *Modelação do crescimento, mortalidade e distribuição diamétrica, do pinhal bravo no Vale do Tâmega*. University of Trás-os-Montes e Alto Douro, PhD Thesis, Vila Real, Portugal, pp. 248.
- FONSECA, T., PARRESOL, B., MARQUES, C., COLIGNY, F.D., 2012a. Models to Implement a Sustainable Forest Management - An Overview of the ModisPinaster Model, Sustainable Forest Management - Current Research. Dr. Julio J. Diez (Ed.), ISBN: 978-953-51-0621-0, InTech, DOI: 10.5772/29808. Available online at: <http://www.intechopen.com/books/sustainable-forest-management-current-research/models-to-implement-a-sustainable-forest-management-an-overview-of-modispinaster-model>,
- FONSECA, T., PARRESOL, B., MARQUES, C., COLIGNY, F.D., VIANA, H., 2012b. ModisPinaster Model. Capsis, Computer-Aided Projection of Strategies In Silviculture. Available online at: [http://capsis.cirad.fr/capsis/help_en/modispinaster?s\[\]=modispinaster](http://capsis.cirad.fr/capsis/help_en/modispinaster?s[]=modispinaster),
- FREIRE, J., TOMÉ, M., TAVARES, M., 2003. Equação de Volume Local para a *Pinus pinaster* Aiton na Serra da Lousã. *Silva Lusitana* 11(2), 207-215.
- HONER, T.G., 1967. *Standard volume tables and merchantable conversion factors for the commercial tree species of Central and Eastern Canada*. Information Report FMR-X-5, Forest Management Research and Service Institute, Ottawa, Ontario, p. 21.
- HUSCH, B., BEERS, T.W., KERSHAW, J.A., 2003. *Forest mensuration*, 4th ed. John Wiley & Sons, New Jersey, pp. 443.
- ICNF, 2013. IFN6 - *Áreas dos usos do solo e das espécies florestais de Portugal continental. Resultados preliminares*. Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas, Lisboa, pp. 33.
- IPCC, 2006. *Guidelines for national greenhouse gas inventories*. Volume 4, Agriculture, forestry and other land use, Cambridge University Press, UK. Available online at: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>, (Accessed February 2013).
- OGAYA, N., 1968. Kubierungsformeln und Bestandesmassenformeln. Univ. Freiburg i. Br., Thesis, pp. 85.
- PARRESOL, B.R., 1999. Assessing tree and stand biomass: a review with examples and critical comparisons. *J For Sci* 45, 573-593.
- PARRESOL, B.R., 2001. Additivity of nonlinear biomass equations. *Canadian Journal of Forest Research* 31, 865-878.

- REED, D.D., GREEN, E.J., 1985. A method of forcing additivity of biomass tables when using nonlinear models. *Canadian Journal of Forest Research* 15, 1184-1187.
- SAS INSTITUTE INC., 2004. *SAS/ETS® 9.1 User's Guide*. Volumes 1 and 2. SAS Institute Inc. Cary, New York.
- SCHUMACHER, F.X., HALL, F., 1933. Logarithmic expression of timber-tree volume. *Journal of Agriculture Research* 47(9), 719-734.
- SPURR, S.H., 1952. *Forest inventory*. Ronald Press, New York, pp. 476.
- TAKATA, K., 1958. Construction of universal diameter-height-curves. *Journal of Japanese Forest Society* 40: 1, 1-6.
- UNITED NATIONS, 1992. *United Nations Framework Convention on Climate Change*. FCCC/INFORMAL/84. GE.05-62220 (E) 200705. Available online at: <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/conveng.pdf>, (Accessed April 2013).
- UNITED NATIONS, 1998. *Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change*, pp. 21. Available online at: <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf>, (Accessed April 2013).
- VIANA, H., COHEN, W.B., LOPES, D., ARANHA, J., 2010. Assessment of forest biomass for use as energy. GIS-based analysis of geographical availability and locations of wood-fired power plants in Portugal. *Applied Energy* 87, 2551-2560.
- VIANA, H., 2012. *Modelling and mapping aboveground biomass for energy usage and carbon storage assessment in mediterranean ecosystems*. University of Trás-os-Montes e Alto Douro, PhD Thesis, Vila Real, Portugal, pp. 428.
- ZIANIS, D., MUUKKONEN, P., MÄKIPÄÄ, R., MENCUCCINI, M., 2005. *Biomass and stem volume equations for tree species in Europe*. Silva Fennica Monographs 4. Finnish Society of Forest Science, p. 63.