

ISSN 0104-1347

Eficiência de captura de energia solar por dosséis de *Eucalyptus pellita* F. Muell sob várias densidades de plantio

Solar energy capture efficiency by canopies of *Eucalyptus pellita* F. Muell under several planting densities

Nilson Augusto Villa Nova¹, Paulo Roberto Moreira² e André Belmont Pereira³

Resumo - Neste trabalho determinou-se a eficiência de captura de radiação solar por um dossel de *Eucalyptus pellita* F. Muell, sob diferentes densidades de plantio, em um ciclo de sete anos. Com a eficiência de captura de radiação solar, foi estabelecido um modelo para estimar não só a produção de biomassa total do dossel, assim como aquela apenas de troncos. As equações obtidas, testadas na própria população do ensaio mostraram altos valores de correlação, sendo superiores a 0,92. O modelo foi elaborado com dados de um experimento conduzido por MARQUEZ (1997) em Lagoa Grande, MG (17°42' S, 46°28' W Gr, 550 m), clima do tipo Cwa, segundo a classificação de Köppen, com precipitação anual entre 900 e 1200 mm e déficit hídrico anual menor que 140 mm. Espera-se que o modelo possa ser utilizado para futuras avaliações de seqüestro de carbono pelo *Eucalyptus sp*, em condições edáficas e climáticas similares.

Palavras-chave: energia solar, produção de biomassa, seqüestro de carbono.

Abstract – In the current manuscript it was determined the global solar radiation capture efficiency by a canopy of *Eucalyptus pellita* F. Muell under different planting densities throughout a seven year cycle. By means of assessment of values of capture efficiency, a model is proposed to estimate the production of canopy total biomass, as well as only of branches. The obtained equations were tested experimentally and had showed high correlation coefficients with values above 0.92. The model has been elaborated with data collected in a trial carried out by MARQUEZ (1997) at Lagoa Grande, MG, Brazil (17°42' S, 46°28' W Gr, 550 m), whose climatic formulae according to Köppen classification is Cwa with an annual precipitation between 900 and 1200 mm year⁻¹ and an annual water deficit lower than 140 mm. It is expected that the model in study might be utilized for future evaluations of carbon sequestration by *Eucalyptus sp* under similar climatic and edaphic conditions.

Keywords: solar energy, biomass production, carbon sequestration.

Introdução

É fato reconhecido que a quantidade de dióxido de carbono (CO₂), um dos principais gases traços que provocam o “efeito estufa”, vem crescendo na atmosfera terrestre nas últimas décadas, em função

de sua liberação, advinda principalmente da queima de combustíveis fósseis. Acordos internacionais para redução da emissão de CO₂ foram unanimidade no protocolo de Kyoto (UNFCCC, 1997; IPCC, 2001), para minimizar possíveis problemas econômicos, que limitariam a produção industrial.

¹Engº Agrº, Professor Associado - Dep. de Ciências Exatas – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” - CP 9, CEP 13418-900 Piracicaba, SP. Bolsista do CNPq. E-mail: navnova@carpa.ciagri.usp.br

²Engº Florestal, Doutorando em Biologia Vegetal – Instituto de Biociências – Universidade Estadual Paulista. Rio Claro, SP, CEP 13400-000. Bolsista da FAPESP. E-mail: paulofloresta@terra.com.br

³Engº Agrº, Professor Adjunto – Dep. de Ciência do Solo e Engenharia Agrícola – Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, PR, CEP 84030-900. E-mail: abelmont@uepg.br

A captura do carbono emitido tem sido recomendada em função da produção de biomassa, por meio do plantio e manejo de florestas. Para se avaliar o sucesso desta ação faz-se necessário conhecer a distribuição da biomassa nos diferentes compartimentos de uma floresta, e vários trabalhos têm sido realizados com tal objetivo (COOPER, 1983; BROWN & LUGO, 1984; BROWN *et al.*, 1986; SCHROEDENER, 1992; BECKER *et al.*, 1995; CONTRERAS, 1997; SOARES & OLIVEIRA, 2002; MUND *et al.*, 2002).

O aumento da fitomassa depende não só do potencial genético de cada material para fixar e alocar carbono, mas também de absorver água e nutrientes. Depende também de fatores edafoclimáticos, como radiação solar, temperatura, disponibilidade de água e nutrientes (CROMER, 1984), e de fatores bióticos, como doenças, pragas e competição com outras plantas que crescem no mesmo espaço físico.

A avaliação da produção de biomassa é importante para o planejamento da indústria que depende da matéria-prima florestal (PEREIRA, 1990). Povoamentos jovens de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*, na região de cerrado, mostraram que o acúmulo de nutrientes na biomassa por unidade de área aumentou com a idade da floresta e a redução do espaçamento (PEREIRA, 1990). A biomassa da raiz pivotante de *E. camaldulensis*, *E. urophylla*, e *E. pellita* aumenta com a idade e com o aumento do espaçamento, independentemente da espécie (BERNARDO, 1995).

O diâmetro das árvores e, conseqüentemente, a área basal e o volume são as características mais afetadas pela densidade de plantio. Em geral, espaçamentos amplos favorecem o crescimento em diâmetro das plantas, como um resultado da maior disponibilidade de água, de radiação solar e de nutrientes. Árvores crescendo sem competição puderam alocar mais biomassa para as raízes e para os galhos, em detrimento da produção de troncos (LELES, 1995), sendo inconveniente quando a madeira é o componente comercial da floresta.

Assim o principal objetivo deste trabalho foi estimar a capacidade de produção de biomassa e a correspondente captura de CO₂ de dosséis de *Eucalyptus pellita* F. Muell, em função da densidade de plantio e da energia solar disponível.

Material e métodos

A eficiência fotossintética de captura de energia (e%) pode ser definida como sendo a relação entre a energia fixada na fitomassa de um dossel, expressa em kcal ha⁻¹ ciclo⁻¹, dividida pela energia solar disponível ao longo do ciclo da espécie, expressa em kcal m² ciclo⁻¹, ou seja:

$$e\% = \frac{\text{kcal m}^{-2} \text{ ciclo}^{-1}}{\text{kcal disponível m}^{-2} \text{ ciclo}^{-1}} 100 \quad (1)$$

A energia fixada pelo dossel depende da fitomassa de cada árvore (p, em kg árvore⁻¹ ciclo⁻¹) e do poder calorífico médio (q, em kcal kg⁻¹) da madeira seca. A energia solar disponível no ciclo depende do poder de reflexão da vegetação (r, coeficiente de reflexão) e das condições climáticas locais.

$$e\% = \frac{p q}{A a\% Q_g (1 - r) t 365} 100 \quad (2)$$

em que *q* é o poder calorífico médio da madeira seca, elaborada, dependente da densidade, em kcal kg⁻¹, sendo adotado o valor de 4000 kcal kg⁻¹; *p* o peso total da matéria seca elaborada em kg árvore⁻¹ciclo⁻¹, ou em kg tronco⁻¹ciclo⁻¹; *A* é a área ocupada por cada árvore (m² planta⁻¹); *t* é o número de dias do ciclo (dias ciclo⁻¹); *Q_g*, o valor médio da radiação global disponível ao longo do ciclo (kcal m² d⁻¹); *a*% é o valor da fração fotossinteticamente ativa (PAR) em % da radiação global; *r*, o poder refletor do dossel (adimensional)

Assim, a eficiência de e% fica definida pela equação (3), quando se considera *a*% = 1 e *r* = 0, como se segue:

$$e\% = \frac{0,274 p q}{A Q_g t} \quad (3)$$

De acordo com a equação (3), determinou-se também um modelo para estimativa de produção P, em função de *A*, *Q_g* e *t*.

Por meio do extensivo trabalho de pesquisa realizado por MARQUEZ (1997), com *Eucalyptus pellita* F. Muell, foi possível estimar a ordem de grandeza dos coeficientes de eficiência fotossintética (e%), dada pelo quociente entre a energia solar fixada pela comunidade vegetal e a radiação solar global incidente.

É óbvio que o principal fator que condiciona e% para uma determinada espécie, em um dado tempo

de ciclo, é a densidade de plantio. Diferenças de índice área foliar entre espécies também influem na eficiência de captura de energia solar por ser a folha o elemento de captação de energia pelo dossel.

No seu trabalho, Marquez fornece, para nove densidades de plantio (espaçamento), o total de matéria seca produzida em termos de tronco, galhos, folha e raízes da espécie *Eucalyptus pellita* F. Muell, no município de Lagoa Grande, MG (17°42' S, 46°28' W Gr, 550 m), durante um período de sete anos (1987-1994). A temperatura média anual da região oscila entre 22 e 24°C, as chuvas são de verão com inverno seco, a precipitação anual está entre 900 e 1200 mm, com déficit hídrico anual entre 70 a 140 mm, reunindo condições ambientais que caracterizam uma restrição hídrica moderada para o desenvolvimento do Eucalipto. A radiação solar global foi monitorada pelo satélite Góes-8, lançado pelo INMET (1998) durante o período compreendido entre 1990 e 1998, tendo sido expressa em kcal m⁻² dia⁻¹.

Resultados

Na Tabela 1, são apresentados os resultados obtidos medidos no experimento, assim como os dados calculados pela metodologia proposta, discriminados nas colunas com seus respectivos significados.

Os dados de densidade de fluxo de radiação solar global para a região em estudo foram

determinados pelo Instituto Nacional de Meteorologia, INMET (1998), no período compreendido entre 1993 a 1998, tendo sido obtidos pelo satélite Góes-8 e expressos em kcal m⁻² dia⁻¹.

Na Figura 1, são demonstradas equações e linhas de tendência da interação entre eficiência de captura da radiação solar [eT (%) e et (%)] e a área ocupada (A) por cada planta. O estudo de regressão (Figura 1) demonstrou uma boa concordância nas condições do experimento para as interações entre eT(%) e et(%) em função da variável preditora área ocupada pela árvore, como se pode observar pelas seguintes equações:

$$eT (\%) = 1,253 A^{-0,4931} \quad R^2 = 0,950 \quad (4)$$

$$et (\%) = 1,014 A^{-0,6659} \quad R^2 = 0,959 \quad (5)$$

Uma vez conhecidos os valores de Qg, a%, r e A, para determinada região, é possível estimar, por meio das equações (3), (4) e (5), o potencial de produção de *Eucalyptus pellita* F. Muell. Para um ciclo de 7 anos, de acordo com a combinação das equações (3), (4) e (5), obtiveram-se as equações (6) e (7), nas quais foram inseridas as porcentagens de sobrevivência observadas (S%).

$$PMST = \frac{0,1143 Qg t S\%}{A^{0,4931}} \quad (6)$$

$$PMSt = \frac{0,0925 Qg t S\%}{A^{0,6659}} \quad (7)$$

Tabela 1 Resultados obtidos para eficiência de aproveitamento da radiação solar global (Qg), em relação à matéria seca total (eT%) e a matéria seca do tronco (et %), para *Eucalyptus pellita* F. Muell, ciclo de sete anos em diferentes espaçamentos..

Espaça- mento (m)	Área ocupada (m ² por árvore)	Número árvores por ha	S (%)	N	MSA (kg árvore ⁻¹)	tr (%)	MSt (kg tronco ⁻¹)	Qg (kcal m ⁻² d ⁻¹)	eT (%)	et (%)
9 x 9	81	123	100	123	346,1	0,348	120,40	5000	0,134	0,0465
6 x 4	24	417	80	333	200,7	0,485	98,14	5000	0,262	0,128
3 x 6	18	555	83,3	463	173,7	0,529	91,88	5000	0,302	0,160
3 x 5	15	666	73,3	489	148,2	0,507	95,1	5000	0,309	0,157
3 x 4	12	833	66,7	556	151,1	0,537	80,08	5000	0,394	0,211
3 x 3	9	1111	76,7	852	143,4	0,573	82,16	5000	0,499	0,286
3 x 2	6	1666	80,0	1133	107,5	0,579	61,810	5000	0,560	0,331
3 x 1,5	4,5	2222	53,3	1184	86,94	0,622	54,08	5000	0,604	0,376
3 x 1	3	3333	56,7	1890	58,02	0,626	36,32	5000	0,605	0,379

Os termos da tabela significam: S = porcentagem de sobrevivência; N = número de árvores sobreviventes por hectare; MSA = matéria seca total da árvore; tr = porcentagem de biomassa do tronco em relação à árvore total; MSt = matéria seca por tronco; Qg = radiação solar global; eT = eficiência fotossintética de captura relativa à biomassa total da árvore; et = eficiência fotossintética de captura relativa à biomassa do tronco.

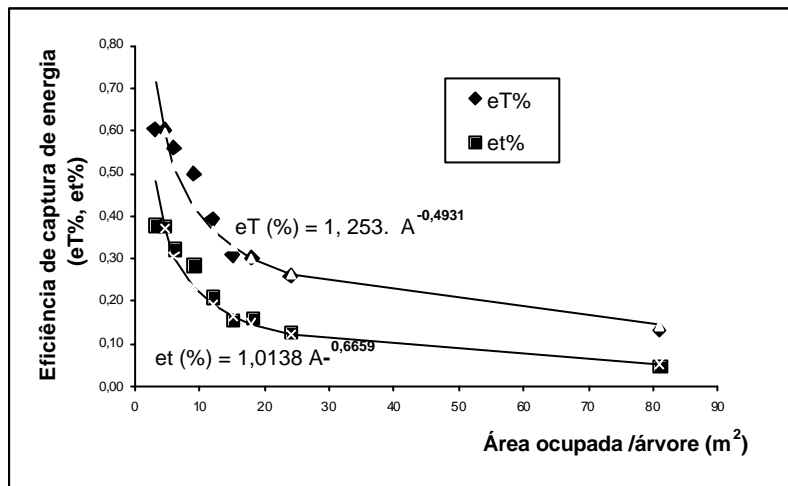


Figura 1. Eficiência de captura de energia solar pela árvore toda (eT%) e pelo tronco apenas (et%) versus densidade de plantio em uma comunidade de *Eucalyptus pellita* F. Muell com sete anos de idade no município de Viçosa, MG.

sendo $PMST$ a produção de matéria seca total em $\text{kg ha}^{-1} \text{ ciclo}^{-1}$; $PMSt$, a produção de matéria seca total do tronco (exceto casca) em $\text{kg ha}^{-1} \text{ ciclo}^{-1}$; Qg é a radiação solar global, média diária anual em $\text{kcal m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ e t é a duração do ciclo da cultura em anos.

De acordo com os dados da Tabela 1 e com o gráfico apresentado na Figura 2, a relação entre as estimativas obtidas pelas equações (6) e (7), P^* (produção estimada) e P (produção medida) foram as seguintes:

$$P^*MST = 0,9937 PMST \quad R^2 = 0,857 \quad (8)$$

$$P^*MSt = 0,9881 PMSt \quad R^2 = 0,854 \quad (9)$$

em que P^*MST é a matéria seca total estimada; P^*MSt , a matéria seca do tronco estimada; $PMST$, a matéria seca total observada e $PMSt$ a matéria seca do tronco observada.

Discussão

Os resultados determinados pela equação (2), demonstrados na Tabela 1, foram obtidos em duas condições particulares:

- a) O valor de $a\%$ (fração PAR) foi considerado unitário ($a\%=1$), embora em média corresponda ao valor 0,45;

- b) Não se considerou o poder refletor (r) do dossel, cujo valor médio é de 0,20.

Decorre então que, se o objetivo for considerar estes dois valores, devemos multiplicar os rendimentos obtidos pelo fator de correção (FC) no termo Qg , ou seja,

$$Qgc = Qg \ a\% \ (1 - r) \quad (10)$$

em que Qgc é a radiação solar fotossinteticamente ativa corrigida.

No caso em que $a = 0,45$ e $r = 0,2$, tem-se que:

$$Qgc = 0,36Qg \quad (11)$$

Nesta condição para corrigir os valores obtidos na Tabela 1, há a necessidade de multiplicar tais valores pelo FC, dado por:

$$FC = \frac{1}{a(1-r)} = \frac{1}{0,45(1-0,2)} \cong 2,77 \quad (12)$$

Estes resultados foram relativos ao valor médio diário anual da radiação solar observada na área igual a $5000 \text{ kcal m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Assim, pode concluir-se que a eficiência de captura de energia solar, extremamente importante para modelar o potencial de produção de um dado local, é uma função direta da densidade de plantio (número de árvores por hectare), como não poderia deixar de ser, posto que o índice de área foliar é quem determina o valor de $e\%$. Sabe-se que, dependendo da arquitetura de cada espécie arbórea dada pela geometria de exposição dos galhos, o valor de $e\%$ poderá variar, como se pode observar no trabalho de MARQUEZ (1997), quando a espécie de *Eucalyptus pellita* F. Muell plantada no mesmo experimento, a partir do espaçamento 3×5 m, demonstra decréscimo na produtividade global, o que mostra que esta espécie não tolera espaçamentos entre plantas mais adensados.

É óbvio que condições edáficas distintas e relativas à disponibilidade hídrica das parcelas que compõem o experimento deverão influir nos valores de eficiência de captura observados. Variações nas

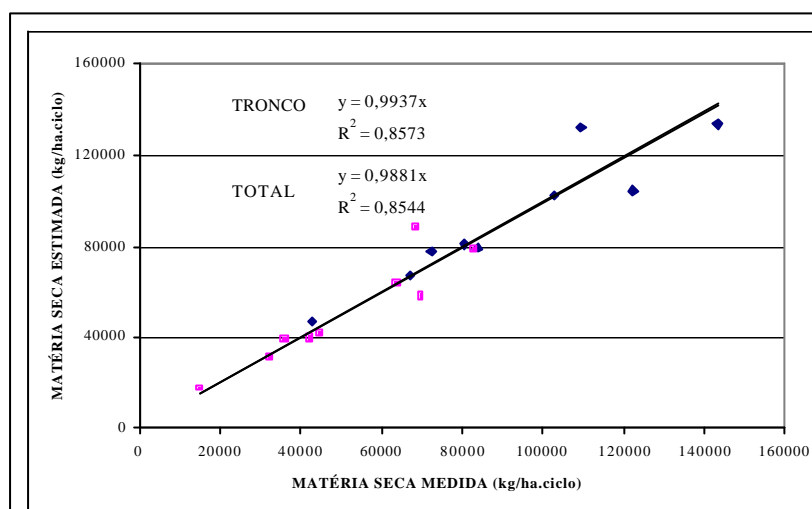


Figura 2. Relações entre matéria seca total estimada (P*MST) e matéria seca do tronco estimada (P*MSt) contra os respectivos valores medidos em uma comunidade de *Eucalyptus pellita* F. Muell com sete anos de idade no município de Viçosa, MG.

porcentagens de sobrevivência (S%) são também função não só destes fatores, como também da arquitetura da árvore e de suas implicações no desenvolvimento do índice de área foliar (auto-sombreamento excessivo). Nas equações propostas deverão ser feitas correções para os fatores e elementos climáticos que diferirem acentuadamente das condições observadas no experimento em estudo (900 mm anuais de precipitação local e déficit hídrico menor que 140 mm ano⁻¹), o que caracteriza uma situação de restrição hídrica moderada para o *Eucalyptus sp.*

Conclusões

Pelo exposto no trabalho pode concluir-se que:

- A eficiência de aproveitamento da energia solar nas condições deste experimento demonstrou dependência na forma potencial da densidade de plantio, oscilando entre 0,1 a 0,6% em termos de biomassa total, e entre 0,05 a 0,4% em termos de biomassa do tronco;
- As equações de estimativa da produtividade de biomassa total (MST) e do tronco (MSt) estabelecidas, demonstraram que é possível avaliar a produtividade potencial de biomassa de

Eucalyptus sp aos sete anos, por meio da disponibilidade de radiação solar global em função da densidade populacional, desde que se possam estimar as influências modificadoras devidas ao efeito de diferentes condições climáticas e edáficas.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao MSc. Gilberto Marquez pela concessão dos dados de sua dissertação de Mestrado para a elaboração deste trabalho e o primeiro autor agradece ao CNPq pela bolsa de produtividade 1-A concedida desde 1989.

Referências bibliográficas

- BROWN, S.; LUGO, A.E. Biomass of tropical forest: A new estimate based on forest volumes. *Science*, New York, v. 223, p. 1290-1293, 1984.
- BROWN, S.; LUGO, A.E.; CHAPMAN, J. Biomass of tropical tree plantations and its implication for the global carbon budget. *Canadian Journal of Forest Research*, Ottawa, v. 13, p. 390-394, 1986.
- BECKER, M. et al. Long-tern changes in forest productivity in northeastern France: dendroecological approach. In: LANDMANN, G.; BONNEU, M (Eds). *Forest decline and atmospheric deposition effects in the French mountains*. Berlin: Springer, 1995. p. 143-156.
- BERNARDO, A.L. *Crescimento e eficiência nutricional de Eucalyptus spp sob diferentes espaçamentos na região de cerrado de Minas Gerais*. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1995. 131 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa. 1995.
- CONTRERAS, A.A. *Banco de sementes e deposição de folheto e seus nutrientes em povoamentos de bracatinga (Mimosa scabrella Benth) na região metropolitana de Curitiba - PR*. Viçosa: Universidade federal de Viçosa, 1997. 177 p. Tese (Doutorado em Ciências) - Instituto de Biociências, Universidade Federal de Viçosa. 1997.
- COOPER, C.F. Carbon storage in managed forest. *Canadian Journal of Forest Research*, Ottawa, v. 13, n. 1, p. 155-165, 1983.
- CROMER, R.N. Site amelioration for fast growing plantations. In: SYMPOSIUM ON SITE AND

PLANTATIONS, Pretoria, África do Sul. 1984. **Proceedings...** Pretoria, África do Sul: IUFRO, 1984. p. 181-195.

INMET (INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA). **Atlas de irradiação solar do Brasil** (1. versão para irradiação global derivada de satélite e validade na superfície). Florianópolis: Laboratório de Energia Solar – EMC/UFSC, 1998.

IPCC (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE), **Land use, land use change, and forestry: special report, 2001**. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. 297 p.

LELES, P.S.S. **Crescimento, alocação de biomassa e distribuição de nutrientes e uso de água em *E. camaldulensis* e *E. pellita* sob diferentes espaçamentos**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1995. 133 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa. 1995.

MARQUEZ, C.E.C. **Estudo silvicultural e econômico de povoamentos de Eucalipto na região de cerrado de**

- Universidade F
MUND, M. et al
forest chronose
and Manage
2002.

PEREIRA, A.R.
minerais em p
Eucalyptus uro
Universidade Fec
torado em Solos)

SCHOREDENE
rotation tropica
Management, A

SOARES, C.P.F
estimar a quanti
res de eucalypto
vore, Viçosa, v.

United Nations
Change UNFCCC
Framework Con