

Eficiência de conversão da radiação fotossintética interceptada em Fitomassa de mudas de *Eucalyptus dunii* Maiden em função da densidade de plantas e do ambiente de cultivo

Conversion efficiency of photosynthetically active radiation intercepted in *Eucalyptus dunii* Maiden seedlings plant mass related to plant density and growth environment

Carlos Roberto Sanquetta¹, Alexandre Behling², Ana Paula Dalla Corte¹,
Guilherme Camacho Cadori³, Sérgio Costa Junior³ e José Henrique Pedrosa Macedo⁴

Resumo

A produção de fitomassa ocorre em função da eficiência de conversão da radiação solar fotossinteticamente ativa interceptada, variando conforme as condições nas quais as plantas são cultivadas. Assim, o presente trabalho teve como objetivo quantificar a eficiência de conversão da radiação solar fotossinteticamente ativa interceptada em fitomassa (ϵb), de mudas de *Eucalyptus dunii* Maiden quando submetidas a diferentes ambientes de cultivo e densidade de plantas por bandeja. Para tanto, conduziu-se um experimento para estudar a produção de mudas em dois ambientes de cultivo (ambiente natural e estufa plástica) e em duas densidades de plantas por bandeja (alta com 100% de ocupação da bandeja e média com 50%). Foram determinadas a radiação fotossinteticamente ativa interceptada (RFAi), o índice de área foliar (IAF) e a fitomassa seca total das mudas (FST). Comparando-se os ambientes, as mudas cultivadas em estufa tenderam os maiores valores de ϵb , enquanto que, quando comparado às densidades de plantas dentro e cada ambiente, a densidade alta de cultivo tendeu a ter ϵb maiores. A ϵb foi de 7,75 g MJ⁻¹ no tratamento densidade alta e de 5,57 g MJ⁻¹ para a densidade média no ambiente estufa. Para o ambiente natural, a ϵb foi de 4,04 g MJ⁻¹ e 2,91 g MJ⁻¹ para as densidades alta e média respectivamente.

Palavras-chave: radiação fotossinteticamente ativa, eficiência de conversão, índice de área foliar, produção de fitomassa, estufa.

Abstract

Plant mass production occurs depending on the intercepted photosynthetically active radiation (iPAR) conversion efficiency, varying according to the plants cultivation conditions. Therefore, the present paper had the objective of quantifying the conversion efficiency (ϵb) of photosynthetically active radiation intercepted in dry plant mass of *Eucalyptus dunii* Maiden seedlings under different growth environments and plant density per tray conditions. An experiment was done to study seedlings plant mass production under two different environments (natural and greenhouse) and in two plant densities (high and medium). High density meant the tray was 100% occupied, whereas the medium density meant the trays were 50% occupied. Assessed were iPAR; the leaf area index and the seedlings dry mass. Comparing the growth environments, the ϵb values for the greenhouse tended to be higher, whereas when comparing the plants density, the high density conditions tended to lead to higher ϵb values. ϵb was 7.75 g MJ⁻¹ for the high density treatment and 5.57 g MJ⁻¹ for the medium density in the greenhouse environment. For the natural environment, the ϵb was 4.04 g MJ⁻¹ and 2.91 g MJ⁻¹ for the high and medium growth conditions, respectively.

Keywords: photosynthetically active radiation, conversion efficiency, leaf area index, phytomass production, greenhouse.

¹Professor PhD. Associado do Departamento de Ciências Florestais. UFPR - Universidade Federal do Paraná Laboratório de Inventário Florestal - LIF/BIOFIX. Av. Lothário Meissner, 900, Jardim Botânico - 80210170 - Curitiba, PR - Brasil. E-mail: carlos_sanquetta@hotmail.com; anapaulacorte@gmail.com.

²Engenheiro Florestal, Doutorando do Departamento de Ciências Florestais. UFPR - Universidade Federal do Paraná. Laboratório de Inventário Florestal - LIF/BIOFIX, Av. Lothário Meissner, 900, Jardim Botânico - 80210170 - Curitiba, PR - Brasil. E-mail: alexandre.behling@yahoo.com.br.

³Graduando em Engenharia Florestal no Departamento de Ciências Florestais. UFPR - Universidade Federal do Paraná. Laboratório de Inventário Florestal - LIF/BIOFIX, Av. Lothário Meissner, 900, Jardim Botânico - 80210170 - Curitiba, PR - Brasil. E-mail: gccadori@hotmail.com; o.sergio.costa@gmail.com.

⁴Professor PhD Sênior do Departamento de Ciências Florestais. UFPR - Universidade Federal do Paraná. Laboratório Neotropical de Controle Biológico de Plantas - LNCBP. Av. Lothário Meissner, 900, Jardim Botânico - 80210170 - Curitiba, PR - Brasil. E-mail: lncbp@ufpr.br

INTRODUÇÃO

A implantação de plantios florestais, em especial do gênero *Eucalyptus*, tem sido realizada com mudas produzidas em estufas plásticas. Todavia, ambientes protegidos, tais quais as estufas, causam alterações nos elementos meteorológicos como, por exemplo, a radiação solar. No interior da casa de vegetação, esse elemento é um dos primeiros a ser modificado (CARON et al., 2002) e, conseqüentemente, considerado como um fator determinante no crescimento e desenvolvimento das mudas. O crescimento das plantas é uma função do saldo de biomassa acumulada pela fotossíntese. Assim, a dependência de processos fotossintéticos em relação aos ambientes de cultivo é do interesse de profissionais ligados a grande área das Ciências Agrárias, pois a produtividade vegetal e, em consequência, o rendimento de um cultivo, dependem das taxas fotossintéticas em um ambiente (TAIZ; ZEIGER, 2004).

Neste sentido, a produção de biomassa de uma planta depende da quantidade de radiação solar fotossinteticamente ativa absorvida pelas folhas e da eficiência com que a planta converte essa energia radiante em fotoassimilados, por meio da fotossíntese. Em plantas saudáveis que possuem quantidades adequadas de água e nutrientes à disposição, a produção de fitomassa seca é governada pela radiação fotossinteticamente ativa - RFA (MONTEITH, 1965, 1977). Dessa maneira, a RFA interceptada que é convertida em fitomassa, revela a eficiência do uso da radiação - ϵ_b pela espécie (MONTEITH, 1977). Na maioria das vezes, esse mecanismo tem se demonstrado como uma função linear, na qual o coeficiente angular da curva entre a RFA interceptada e matéria seca acumulada determina a eficiência de uso da radiação para a produção de fitomassa, como constatado nos trabalhos desenvolvidos por Stape (2002); Stape et al. (2008); Caron et al. (2014) e Campoe et al. (2013), entre outros.

Um dos fatores que influenciam a ϵ_b é o índice de área foliar, característica que pode ser manipulada por meio da densidade de cultivo das plantas por bandeja. Deste modo, indagações acerca dos espaçamentos têm sido conduzidas com o intuito de encurtar o período para que a cultura intercepte o máximo da radiação solar incidente por unidade de área e tempo, resultando conseqüentemente numa maior produtividade. Tais estudos têm sido conduzidos em razão de que a eficiência

fotossintética é principalmente uma função direta da densidade de plantas, posto que o índice de área foliar é o fator que determina a ϵ_b , conforme destacam Villa Nova et al. (2003).

Dessa maneira, esse trabalho teve como objetivo determinar a eficiência de conversão da radiação solar fotossinteticamente ativa interceptada em fitomassa de mudas de *Eucalyptus dunii* Maiden submetidas a diferentes ambientes e densidades de cultivo de mudas.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado com a espécie *Eucalyptus dunii* Maiden no período de novembro de 2012 a abril de 2013, em dois ambientes de cultivo e duas densidades de mudas por bandeja. O experimento foi conduzido no viveiro do Laboratório de Inventário Florestal (LIF) / Centro de Excelência em Pesquisas sobre Fixação Carbono na Biomassa (BIOFIX), da Universidade Federal do Paraná - UFPR, no município de Curitiba - PR, sob coordenadas geográficas 25° 26' 49" S e 49° 14' 14" W, a 935 m de altitude.

O acúmulo em massa seca total de mudas de *Eucalyptus dunii* foi avaliado em dois ambientes de cultivo: natural e protegido, e em dois níveis de densidades de plantas nas bandejas: 100% e 50%, denominados respectivamente de densidade alta e média. A densidade alta equivaleu a 736 plantas/m² e para a média de 368 plantas/m². O ambiente protegido foi composto por uma casa de vegetação do tipo Pampeana, com cobertura de polietileno de baixa densidade, com 150 μ m de espessura. O ambiente natural foi caracterizado por não ter qualquer tipo de cobertura ou proteção.

No planejamento dos tratamentos, utilizou-se um bifatorial de 2 x 2: dois ambientes de cultivo e duas densidades de cultivo, que foram conduzidos em cinco repetições em delineamento experimental inteiramente casualizado. Cada unidade experimental foi composta por 66 e 48 plantas, respectivamente para 100% e 50% de ocupação, sendo que foram avaliadas apenas as 16 mudas centrais de cada bandeja.

A produção das mudas foi realizada a partir de sementes oriundas de povoamentos clonais da empresa KLABIN® de Telêmaco Borba - PR. Na semeadura, realizada em 20 de novembro de 2012, colocou-se 10 sementes por tubete preenchidos com substrato comercial (Tropstrato HT®). Ao 15º dia após a germinação, efetuou-se o raleio das plântulas, deixando somente a me-

lhor e mais central. Durante a condução do experimento realizaram-se regas diárias utilizando-se um sistema de microaspersão, mantendo-se sempre a capacidade de campo do substrato. Além disso, foram realizadas quatro fertilizações, utilizando fertilizante foliar (*Folly Fertil*) com a seguinte composição: N 15% (202 g L⁻¹); P₂O₅ 22% (297 g L⁻¹); K₂O 2% (27 g L⁻¹). A partir dos 50º dia após a germinação, realizaram-se sete avaliações de fitomassa, com intervalos de 20 dias, em que duas mudas por tratamento e repetição foram amostradas, totalizando 336 mudas avaliadas ao fim do experimento.

A produção de fitomassa seca foi estudada com base no modelo proposto por Monteith (1977), em que esta é uma variável dependente da quantidade de radiação fotossinteticamente ativa interceptada multiplicada pela eficiência de conversão (ϵb) dessa radiação em fitomassa seca. Dessa forma, a ϵb pode ser calculada por meio da relação entre a produção média de fitomassa seca acumulada e a radiação fotossinteticamente ativa interceptada envolvida na produção de fitomassa. Portanto, de acordo com Monteith (1977), tem-se que:

$$PFS = \epsilon b * RFA_t \quad (1)$$

Em que: PFS é a produção de fitomassa seca (g.m⁻²); RFA_t é a radiação solar fotossinteticamente ativa interceptada (MJ.m⁻²); ϵb é a eficiência de conversão da radiação RFAi em fitomassa seca produzida (g.MJ⁻¹).

O cálculo de ϵb , tomando as definições expostas por Draper e Smith (1980), é dado por:

$$\epsilon b = \left(\sum_{i=1}^n x * \sum_{i=1}^n y * n^{-1} \right) * \left\{ \left(\sum_{i=1}^n x \right)^2 * n^{-1} \right\}^{-1} \quad (2)$$

Em que: ϵb é a eficiência de conversão da radiação RFAi em fitomassa seca produzida (g.MJ⁻¹), x é a radiação fotossinteticamente ativa interceptada (MJ.m⁻²), y é a produção de fitomassa seca (g.m⁻²) e n o número de observações.

Se tratando de um modelo sem intercepto, então para o cálculo do coeficiente de determinação (R²) de ϵb , mede-se a variação de y em torno de zero. Essa estatística foi calculada conforme Judge et al. (1988), portanto:

$$R^2 = 1 - ||r||^2 / ||y||^2 \quad (3)$$

Em que: r é um resíduo ortogonal e é definido por $r = r - \hat{y}$, sendo y a produção de fitomassa seca (g.m⁻²) e $\hat{y} = \epsilon b * x$ em que x é a radiação fotossinteticamente ativa interceptada (MJ.m⁻²) e ϵb é definido pela Eq. 2.

A radiação fotossinteticamente ativa interceptada foi determinada com base no modelo proposto por Varlet-Grancher et al. (1989):

$$RFA = 0,95 * RFA_{inc} * (1 - e^{-k*IAF}) \quad (4)$$

Em que RFAi é a radiação fotossinteticamente ativa interceptada (MJ.m⁻²); K é o coeficiente de extinção de luz, uma constante adimensional que depende das propriedades óticas das folhas e da geometria do dossel vegetal (0,28); IAF é o índice de área foliar (adimensional); RFAinc é a radiação fotossinteticamente ativa incidente (MJ.m⁻²).

O índice de área foliar (IAF) foi calculado tomando a definição de Watson (1947), como a área foliar integrada do dossel por unidade de superfície projetada no solo (m²/m²), ou seja:

$$IAF = AF * ASE^{-1} \quad (5)$$

Em que: IAF é o índice de área foliar, adimensional; AF é a área foliar média, em cm² e ASE é a área da bandeja explorada pela planta, em cm².

Para a determinação da área foliar, primeiramente as folhas foram separadas dos demais compartimentos (caule e raiz), para então, ser mensurada a área foliar utilizando-se o integrador CI - 202 *Portable Laser Leaf Area Meter* CID Bio-science. No ambiente natural, os valores de radiação solar global foram obtidos da Estação Climatológica do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), situada a cerca de 350 m do experimento. Desse modo, a radiação fotossinteticamente ativa incidente foi estimada considerando-se como sendo 50% da radiação solar global (HEINEMANN et al., 2005; OLIVEIRA et al., 2007; SPOLADOR et al., 2006). Já no ambiente estufa, a radiação fotossinteticamente ativa foi estimada considerando a transmissividade da cobertura plástica de 56% da radiação solar incidente sobre a cobertura da estufa, que foi medida em intervalos de 10 minutos por um piranômetro (LI200X, Li Cor) instalado a 50 cm de altura do nível do solo.

A fitomassa seca total das plantas foi determinada a partir da soma da massa dos compartimentos folhas, caule e raízes (BENINCASA, 2003). Cada compartimento foi acondicionado em sacos de papel devidamente identificados, sendo estes levados à estufa de circulação forçada à temperatura de 65 °C, até atingir peso constante (SILVA et al., 2007; RESENDE et al., 2011). Posteriormente, pesou-se o material em balança de precisão (*FA2104N, Bioprecisa*) para obtenção da massa seca. A análise de covariância (método de Snedecor) foi aplicada para verificar

a necessidade do uso de funções independentes entre a radiação fotossinteticamente ativa interceptada e o acúmulo de fitomassa seca total nos diferentes tratamentos estudados, determinando assim, se houve diferenças entre os mesmos. Se a diferença não for significativa para a inclinação, uma regressão única pode ser ajustada, ou vice e versa. O teste dos níveis não foi realizado, tendo em vista que o objetivo foi verificar somente o coeficiente angular, visto que é o que determina o valor da eficiência de conversão da radiação fotossinteticamente ativa interceptada em fitomassa. A análise de covariância simples, dada por um teste de F e tomando a concepção de Fresse (1964) foi calculada por meio da seguinte expressão:

$$F = QMD / QMT \quad (6)$$

Em que: QMT = quadrado médio do resíduo das regressões separadas e associadas a i graus de liberdade e QMD = quadrado médio da diferença, isto é, diferença entre a regressão individual e total para os grupos formados e associado a i graus de liberdade.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O fluxo de radiação solar global foi em média de $15,13 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, com variação de $2,13$ a $32 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ e dentro da estufa, em média de $8,47 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, com variação de $1,19$ a $17,92 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$. A disponibilidade de radiação solar global incidente no ambiente estufa foi menor devido à transmissividade do plástico, no entanto, tal redução pode ser compensada em parte pelo aumento da fração da radiação difusa, que é importante por ser multidirecional e penetrar melhor no interior do dossel vegetativo conforme destacam Buriol et al. (1995). Diferentes autores encontraram valores maiores de radiação difusa dentro de estufas de plástico do que ao ambiente externo, tal como, Farias et al. (1993), que verificaram que a radiação difusa externamente foi em média inferior a 65% daquela observada no interior da estufa. O crescimento em fitomassa seca dos tratamentos apresentou relação linear positiva com a radiação fotossinteticamente ativa interceptada acumulada, com altos coeficientes de correlação e com padrão de resposta dependente da densidade de mudas e do ambiente de cultivo (Figura 1 A).

Ao elevar a densidade de mudas na bandeja, a fitomassa acumulada pelas mudas também aumentou, como constataram Ataíde et al. (2010)

e Caron et al. (2014). Essas situações evidenciam que o arranjo de plantas é uma importante prática de manejo, tendo em vista que a interação com a interceptação de radiação solar é um dos principais fatores determinantes do crescimento e desenvolvimento de uma dada cultura. O efeito da luz no crescimento das mudas pode ser constatado em diversos trabalhos, tais quais os de Alvarenga et al. (2003); Mazuchowski et al. (2007); Silva et al. (2007); Dantas et al. (2009) e Resende et al. (2011).

O crescimento do índice de área foliar também apresentou relação linear positiva em relação à radiação fotossinteticamente ativa interceptada acumulada (Figura 1 B). Além disso, o índice de área foliar sempre foi maior nos cultivos em de densidade alta independente do ambiente de cultivo (Figura 1 C). Assim, a densidade de plantas influenciou o incremento do índice de área foliar, pois a mesma, afeta a distribuição da área foliar no dossel das plantas. Logo, o maior acúmulo em matéria seca obtida em função da radiação fotossinteticamente ativa interceptada acumulada na densidade alta está estreitamente ligado ao índice de área foliar, pois à medida que este se eleva, maior é a quantidade de radiação fotossinteticamente ativa interceptada e, conseqüentemente, maior é o acúmulo de fitomassa. O mesmo também foi observado por Stewart et al. (2003). Quando observado os coeficientes angulares obtidos, observou-se que este é dependente do ambiente de cultivo e da densidade de plantas. Comparando-se os ambientes, no estufa os valores de $\hat{a}b$ tenderam a serem maiores, enquanto, que quando se comparado as densidades de cultivo, a densidade alta tendeu a ter $\hat{e}b$ maiores.

No ambiente estufa a eficiência de conversão de fitomassa seca total das mudas em relação à quantidade de radiação solar fotossinteticamente ativa interceptada acumulada foi de $7,75 \text{ g MJ}^{-1}$ no tratamento densidade alta e $5,57 \text{ g MJ}^{-1}$ para em densidade média (Figura 1 D). Já no ambiente natural a $\hat{e}b$ foi de $4,04 \text{ g MJ}^{-1}$ no tratamento densidade alta e $2,91 \text{ g MJ}^{-1}$ para em densidade média.

Os valores de eficiência de conversão da radiação fotossinteticamente ativa em fitomassa aqui obtidos foram próximos aos observados por Caron et al. (2014) em mudas *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden. cultivadas dentro de uma estufa, sendo por sua vez $7,33 \text{ g MJ}^{-1}$, naquelas submetidas a densidade alta, e de $3,26 \text{ g MJ}^{-1}$ para a densidade média. A análise de covariância (ANACOVA) aplicada para regressões independentes para to-

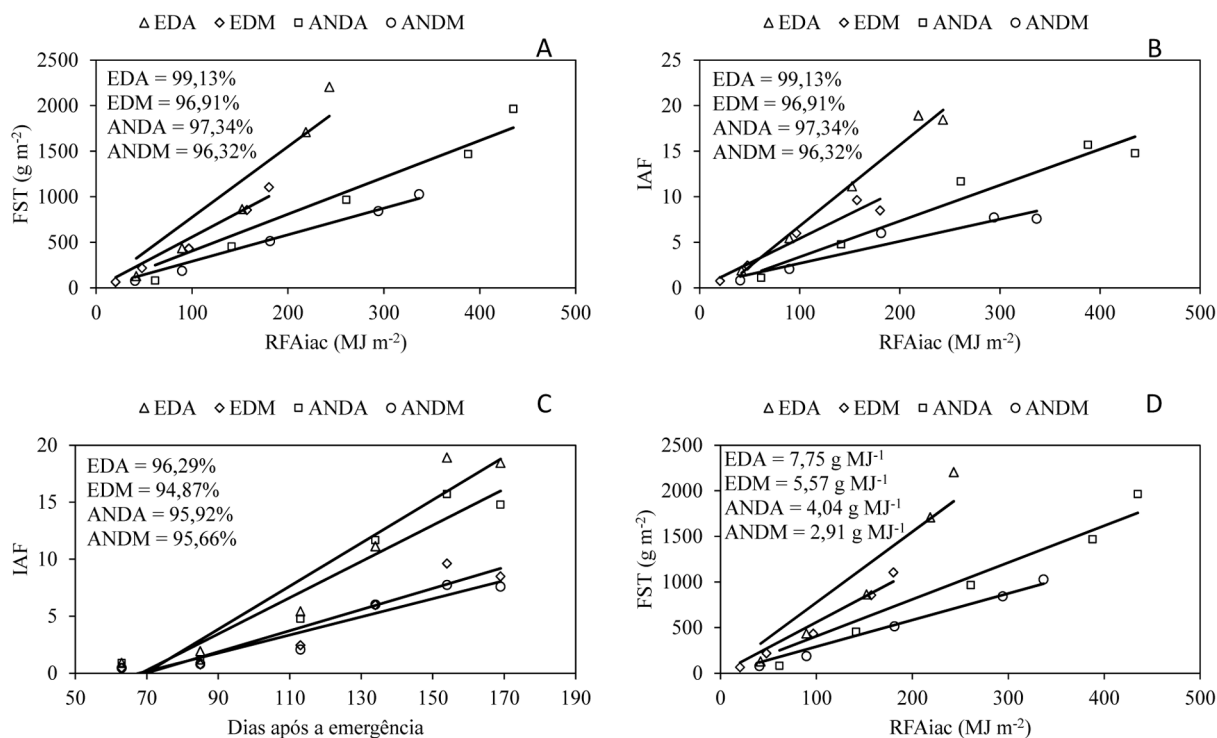


Figura 1. Correlação de Pearson entre a fitomassa seca total - FST (A) de mudas de *Eucalyptus dunnii* Maiden e o índice de área foliar - IAF (B) com a radiação fotossinteticamente ativa interceptada acumulada (RFAiac), tendência do crescimento do índice de área foliar e correlação de Pearson com dias após a emergência (C) e relação entre RFAiac e a produção de fitomassa seca acumulada (FST) (D). Em que EDA: ambiente estufa e arranjo de densidade alta; EDM: ambiente estufa e arranjo de densidade média; ANDA: ambiente natural e arranjo de densidade alta; ANDM: ambiente natural e arranjo de densidade média.

Figure 1. Pearson Correlation between *Eucalyptus dunnii* Maiden seedlings total dry mass - FST (A) and the leaf area index - IAF (B) with the accumulated intercepted photosynthetically active radiation (RFAiac), leaf area index growth trend and Pearson correlation through the seedlings emergence term and the relation between RFAiac and the accumulated dry phytomass production (FST) (D). In which EAD: greenhouse environment and high density; EDM: greenhouse environment and medium density; ANDA: natural environment and high density; ANDM: natural environment and medium density.

dos os tratamentos (densidade alta no ambiente estufa * densidade média no ambiente estufa * densidade alta no ambiente natural * densidade média no ambiente natural) revelou existir diferença significativa entre os valores de eficiência, indicando que as regressões apresentam inclinações diferentes com a variação dos mesmos. Quando verificado regressões independentes

para os diferentes ambientes de cultivo submetidos à mesma densidade, a análise também indicou existir diferença significativa. O mesmo resultado foi obtido quando comparado dentro de um mesmo ambiente as densidades de plantas, indicando assim, que as inclinações variaram com o ambiente de cultivo e com a densidade de plantas de forma independente (Tabela 1).

Tabela 1. Análise de covariância entre retas de eficiência de conversão de radiação fotossinteticamente ativa interceptada acumulada em fitomassa seca de mudas de *Eucalyptus dunnii* Maiden submetidas a diferentes densidades de plantas e ambientes de cultivo.

Table 1. ANACOVA between the conversion efficiency of accumulated intercepted photosynthetically active radiation in *Eucalyptus dunnii* Maiden seedlings dry mass lines over different plants densities and growth environments.

Fator de Variação	GL	QM	F	αF	Igualdade entre o grupo
Diferença para um único grupo (EDA*EDM*ANDA*ANDM)	3	327699,39	22,69	3,10E-05	Não
Diferença - grupo EDA*EDM	1	161778,03	7,42	3,45E-02	Não
Diferença - grupo ANDA*ANDM	1	93113,08	13,14	1,10E-02	Não
Diferença - grupo EDA*ANDA	1	634808,32	24,20	2,66E-03	Não
Diferença - grupo EDM*ANDM	1	139338,87	52,42	3,52E-04	Não

Em que EDA: ambiente estufa e arranjo de densidade alta; EDM: ambiente estufa e arranjo de densidade média; ANDA: ambiente natural e arranjo de densidade alta; ANDM: ambiente natural e arranjo de densidade média. In which EAD: greenhouse environment and high density; EDM: greenhouse environment and medium density; ANDA: natural environment and high density; ANDM: natural environment and medium density.

Os maiores valores de eficiência de conversão observados nos tratamentos com densidade alta de plantas estão relacionados à ocupação mais rápida pela área foliar do espaço entre as mudas, que pode ser constatado através do elevado índice de área foliar observado durante todo o período de condução do experimento. Ao aumentar o índice de área foliar, eleva-se, por conseguinte a superfície de absorção de radiação e também a interceptação de radiação fotossinteticamente ativa. Proporcionalmente, a produção de fitomassa também é maior, pois esta, como constatado, é uma função linear do acúmulo de radiação fotossinteticamente ativa interceptada. Mayers et al. (1991) destacam que a eficiência de conversão está diretamente relacionada ao índice de área foliar da cultura, pois este fator influi no desenvolvimento, manutenção da área foliar e no potencial de produção da fitomassa, visto que seu aumento proporciona um incremento na interceptação de radiação.

Nos dois ambientes, a eficiência da conversão do cultivo sob densidade alta foi aproximadamente 28% maior quando comparada com as submetidas à densidade média, isso é constatado quando verificamos em termos percentuais as diferenças entre os coeficientes obtidos. A maior eficiência de uso da radiação na densidade alta de plantas por bandeja também pode ser explicada por causa do aumento da contribuição relativa das folhas sombreadas para o acúmulo de fitomassa das mudas, o que também foi constatado no tomateiro por Radin et al. (2003). Já Caron et al. (2013a) observaram que o aumento da densidade de mudas de eucalipto aumentou em 44% a eficiência de conversão.

Desta maneira, pode-se inferir que o cultivo sob condições de alta densidade de plantas, foi a mais eficiente na interceptação da RFA e isso ocorre devido à ocupação mais rápida do espaço entre as mudas pela área foliar durante o período de crescimento, como também observado por Kunz et al. (2007), o que permite dentro de um mesmo período maior interceptação de RFA.

Nas duas densidades de plantas, a eficiência da conversão do cultivo das mudas no ambiente estufa foi aproximadamente 48% maior quando comparada às submetidas ao ambiente natural. Os maiores valores de eficiência de uso da radiação em cultivos dentro de estufas plásticas quando comparados aos em ambiente natural é explicado pelo aumento da radiação difusa nesse ambiente, conforme demonstrado por Hammer e Vanderlip (1989). O aumento da radiação

difusa promove maior uniformidade da radiação no interior do dossel, fazendo com que as folhas inferiores aumentam a interceptação de radiação e também o seu uso. No cultivo de mudas, o suprimento de água e nutrientes não se demonstram como fatores limitantes, uma vez que há possibilidade de controle desses elementos. Sendo assim, a produção de fitomassa vem a ser controlada pela radiação solar, o que foi observado e também proposto por Monteith (1965). Desta maneira, o crescimento de mudas de eucalipto dependerá da quantidade de radiação fotossinteticamente ativa interceptada, da eficiência de utilização dessa energia no processo fotossintético, da densidade de plantas por bandeja e do ambiente de cultivo.

As equações obtidas revelaram que a ϵb pode explicar mais que 96% da produção de fitomassa, com um erro padrão da estimativa menor que 26% para todos os casos. A modelagem da eficiência pela qual a radiação solar fotossinteticamente incidente é utilizada no acúmulo de fitomassa de mudas de eucalipto se demonstra consistente para modelos potenciais, e apropriadas para a análise do crescimento de mudas, o que também já foi indicado por Müller e Bergamaschi (2005) para outros cultivos. Essa situação também é evidenciada através das excelentes estatísticas de ajuste das relações obtidas entre ϵb e a produção de fitomassa.

CONCLUSÕES

O ambiente e a densidade de cultivo de plantas influenciam os valores de eficiência de conversão da radiação fotossinteticamente ativa em fitomassa.

A ϵb é maior no ambiente estufa e na densidade alta.

A ϵb foi de 7,75 g MJ⁻¹ no tratamento densidade alta e 5,57 g MJ⁻¹ para em densidade média no ambiente estufa e de 4,04 g MJ⁻¹ e 2,91 g MJ⁻¹ no ambiente natural, respectivamente.

Para um mesmo valor de radiação fotossinteticamente ativa interceptada, se obtém maior eficiência de uso da radiação no acúmulo em matéria seca quando as mudas de *E. dunii* são cultivadas em densidade alta e no ambiente estufa.

AGRADECIMENTOS

CNPq, pelo incentivo à pesquisa
LIF/BIOFIX, pela concessão dos dados

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVARENGA, A. A.; CASTRO, E. M.; LIMA JUNIOR, E. C.; MAGALHÃES, M. M. Effects of different light levels on the initial growth and photosynthesis of *Croton urucurana* Baill. in southeastern Brazil. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 27, n. 1, p. 53-57, 2003.
- ATAÍDE, M. G.; CASTRO, R.; SANTANA, R.; DIAS, B.; CORREIA, A.; MENDES, A. Efeito da densidade na bandeja sobre o crescimento de mudas de eucalipto. **Revista Trópica**, Chapadinha, v. 4, n. 2, p. 21, 2010.
- BENINCASA, M. M. P. **Análise de crescimento de plantas (noções básicas)**. Jaboticabal: FCAVUNESP, 2003. 42 p.
- BURIOL, G. A.; STRECK, N. A.; PETRY, C.; SCHNEIDER, F. M. Transmissividade da radiação solar do polietileno de baixa densidade utilizado em estufa. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 25, n. 1, p. 1-4, 1995.
- CAMPOE, O. C.; STAPE, J. L.; NOUVELLON, Y.; LACLAU, J. P.; BAUERLE, W. L.; BINKEY, D.; LE MARIE, G. Stem production, light absorption and light use efficiency between dominant and non-dominant trees of *Eucalyptus grandis* across a productivity gradient in Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 288, n. 1, p. 14-20, 2013.
- CARON, B.O.; SCHIMIT, D.; MANFRON, P. A.; BEHLING, A.; ELOY, E.; BUSANELLO, C. Eficiência do uso da radiação solar por plantas *Ilex paraguariensis* A. ST. HIL. cultivadas sob sombreamento e a pleno sol. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 24, n. 2, p. 257-265, 2014.
- CARON, B.; SOUZA, V. Q.; TREVISAN, R.; BEHLING, A.; SCHMIDT, D.; BAMBERG, R.; ELOY, E. A Eficiência de conversão da radiação solar fotossinteticamente ativa e distribuição de fitomassa produzida no meloeiro cultivado em estufa plástica na primavera. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Sete Lagoas, v. 10, n. 2, p. 215-219, 2002.
- DANTAS, B. E.; LOPES, A. P.; SILVA, F. F. S.; LÚCIO, A. A.; BATISTA, P. F.; PIRES, M. M. M. L.; ARAGAO, C. A. Taxas de crescimento de mudas de catingueira submetidas a diferentes substratos e sombreamentos. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 33, n. 3, p. 413-423, 2009.
- DRAPER, N.R.; SMITH, R. **Applied regression analysis**. New York: John Wiley & Sons, 1980. 407 p.
- FARIAS, J. R. B.; BERGAMASCHI, H.; MARTINS, S. R. Efeito da cobertura plástica sobre a radiação solar. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Sete Lagoas, v. 1, n. 1, p. 31-36, 1993.
- FRESSE, F. **Linear Regression Methods for Forest Research**. USA: US. Department of Agriculture Forest Service, 1964. 148 p.
- HAMMER, G. L.; VANDERLIP, R. L. Genotype by environment interaction in grain sorghum – I: effects of temperature on radiation use efficiency. **Crop Science**, Madison, v. 29, n. 2, p. 370-376, 1989.
- HEINEMANN, A. B.; STONE, L. F.; DIDONET, A. D.; TRINDADE, M. G.; SOARES, B. B.; MOREIRA, J. A. A.; CÁNOVAS, A. D. Eficiência de uso da radiação solar na produtividade do trigo decorrente da adubação nitrogenada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 2, p. 352-356, 2006.
- JUDGE, G.G.; HILL, R. C.; GRIFFITHS, W. E.; LUTKPOHL, H.; LEE, T. C. **Introduction to the theory and practice of econometrics**. New York, John Wiley & Sons, 1988. 1024 p.
- KUNZ, J. H.; BERGONCI, J. I.; BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G. A.; HECKLER, B. M. M.; COMIRAN, F. Uso da radiação solar pelo milho sob diferentes preparos do solo, espaçamento e disponibilidade hídrica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 11, p. 1511-1520, 2007.
- MAYERS, J. D.; LAWN, R. J.; BYTH, D. E. Agronomic studies on soybean (*Glycine max* (L.) Merrill) in the dry seasons of the tropics. II. Interaction of sowing date and sowing density. **Australian Journal of Agricultural Research**, Victória, v. 42, n. 7, p. 1093-1107, 1991.
- MAZUCHOWSKI, J. Z.; SILVA, E. T.; MACCARI, J. A. Efeito da luminosidade e da adição de nitrogênio no crescimento de plantas de *Ilex paraguariensis* St. Hil. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 31, n. 4, p. 619-627, 2007.
- MONTEITH, J. L. Climate and the efficiency of crop production in Britain. **Proceedings of the Royal Society of London**, London, v. 281, n. 980, p. 277-294, 1977.

- MONTEITH, J. L. Light distribution and photosynthesis in field crops. *Annals of Botany*, Oxford, v. 29, p. 17- 37, 1965.
- MÜLLER. A. G.; H. BERGAMASCHI. Eficiências de interceptação, absorção e uso da radiação fotossinteticamente ativa pelo milho (*Zea mays* L.), em diferentes disponibilidades hídricas e verificação do modelo energético de estimativa da massa seca acumulada. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Sete Lagoas, v. 13, n. 1, p. 27-33, 2005.
- OLIVEIRA, A. S.; GAIO, D. C.; WYREPKOWSKI, C. C.; CAMPELO JUNIOR, J. H.; LOBO, F. A.; NOGUEIRA, J. S.; SANCHES, L. PALÚ, A. E. R.; RODRIGUES, V. Eficiência de utilização da radiação fotossinteticamente ativa na produção de matéria seca de uma pastagem mista no cerrado de Mato Grosso. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Sete Lagoas, v. 15, n. 3, p. 299-303, 2007.
- RADIN, B.; BERGAMASCHI, H.; REISSER JÚNIOR, C.; BARNI, N. A.; MATZNAUER R.; DIDONÉ, I. A. Eficiência de uso da radiação fotossinteticamente ativa pela cultura do tomateiro em diferentes ambientes. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 38, n. 9, p. 1017-1023, 2003.
- RESENDE, S. V.; CREPALDI, I. C.; PELACANI, C. R.; BRITO, A. L. Influência da luz e substrato na germinação e desenvolvimento inicial de duas espécies de *Calliandra* Benth: (Mimosoideae - Leguminosae) endêmicas da Chapada Diamantina, Bahia. *Revista Árvore*, v. 35, n. 1, p. 107-117, 2011.
- SILVA, B. M. S.; LIMA, J. D.; DANTAS, V. A. V.; MORAES, W. S.; SABONARO, D. Z. Efeito da luz no crescimento de mudas de *Hymenaea parvifolia* Huber. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 31, n. 6, p. 1019-1026, 2007.
- SPOLADOR, J.; SANCHES, L.; COSTA, M. Radiação fotossinteticamente ativa em uma floresta de transição cerrado-amazônica. *Revista Brasileira de Meteorologia*, São José dos Campos, v. 21, n. 3b, p. 301-307, 2006.
- STAPE, J. L. **Production ecology of clonal Eucalyptus plantations in northeastern Brazil**. 2002. 225 p. Thesis (PhD in Forest Sciences) – Colorado State University, Fort Collins, 2002.
- STAPE, J. L.; BINKLEY, D.; RYAN, M. G. Production and carbon allocation in a clonal *Eucalyptus* plantation with water and nutrient manipulations. *Forest ecology and Management*, Amsterdam, v. 255, n. 3- 4, p. 920-930, 2008.
- STEWART, D. W.; COSTA, C.; DWYER, L. M.; SMITH, D. L.; HAMILTON, R. I.; MA, B. L. Canopy structure, light interception and photosynthesis in maize. *Agronomy Journal*, Madison, v. 95, p. 1465-1474, 2003.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. Porto Alegre: Artmed, 2004. 719 p.
- VARLET-GRANCHER, C. ; GOSSE, G. ; CHARTIER, M. ; SINOQUET, H. ; BONHOME, R. ; ALLIRAND, J. M. Mise au point: rayonnement solaire absorbé ou intercepté par un couvert végétal. *Agronomie*, v. 9, n. 5 p. 419-439. 1989.
- VILLA NOVA, N. A.; MOREIRA, P. R.; PEREIRA, A. B. Eficiência de captura de energia solar por um dossel de *Eucalyptus pellita* F. Muell sob várias densidades de plantio. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Sete Lagoas, v. 11, n. 2, p. 63-68, 2003.
- WATSON, D. J. Comparative physiological studies on growth of field crops. I. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. *Annals of Botany*, Oxford, v. 11, n. 1, p. 41-76, 1947.

Recebido em 22/08/2013
Aceito para publicação em 28/07/2014