

**Universidade de São Paulo  
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Efeito de práticas silviculturais sobre a produtividade primária líquida de madeira, o índice de área foliar e a eficiência do uso da luz em plantios de restauração da Mata Atlântica**

**Otávio Camargo Campoe**

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Recursos Florestais, com opção em Silvicultura e Manejo Florestal

**Piracicaba  
2008**

**Otávio Camargo Campoe**  
**Engenheiro Florestal**

**Efeito de práticas silviculturais sobre a produtividade primária líquida de madeira,  
o índice de área foliar e a eficiência do uso da luz em plantios de restauração da  
Mata Atlântica**

Orientador:  
Prof. Dr. **JOSÉ LUIZ STAPE**

Dissertação apresentada para obtenção do título de  
Mestre em Recursos Florestais, com opção em  
Silvicultura e Manejo Florestal

**Piracicaba**  
**2008**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP**

Campoe, Otávio Camargo

Efeito de práticas silviculturais sobre a produtividade primária líquida de madeira, o índice de área foliar e a eficiência do uso da luz em plantios de restauração da Mata Atlântica / Otávio Camargo Campoe. - - Piracicaba, 2008.

120 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2008.  
Bibliografia.

1. Ecofisiologia vegetal
2. Luz – Eficiência
3. Mata Atlântica – Restauração
4. Silvicultura – Produtividade I. Título

CDD 634.94

**“Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor”**

**A Deus**

**A minha noiva Marcela**

**Aos meus pais Reginaldo e Carmen**

**A minha irmã Mônica**

**Pelo constante incentivo recebido e pelo amor eterno que tenho por todos!**

**Muito Obrigado!**

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Prof. Dr. José Luiz Stape, pela confiança ao receber-me como orientado e ensinar-me a ver as coisas de novos pontos de vista.

A Profa. Dra. Vera Lex Engel, pela orientação durante os anos de graduação e por me motivar a cursar o mestrado.

A toda a equipe da Estação Experimental de Ciências Florestais de Anhembi, em especial ao engenheiro florestal João Carlos Teixeira Mendes e aos funcionários Carlos Eduardo Costa Maria e Antonio Carlos Pedrozo, pelo grande auxílio com as atividades de campo.

Ao Grupo Florestal Monte Olimpo, em especial aos alunos Ricardo Michael de Melo Sixel e Bruno Assunção Noronha, pelo auxílio com os trabalhos de campo, coleta e processamento de material.

Aos meus amigos do Laboratório de Ecofisiologia Florestal e Silvicultura pelas discussões e aprendizado.

Ao convênio IPEF/ESALQ – Petrobrás S.A., pela oportunidade da pesquisa na área experimental.

A FAPESP pela bolsa de mestrado concedida.

## SUMÁRIO

RESUMO.....	7
ABSTRACT.....	8
1 INTRODUÇÃO.....	9
2 DESENVOLVIMENTO.....	13
2.1 Mata Atlântica.....	13
2.2 Restauração Florestal.....	14
2.3 Ecofisiologia Florestal.....	18
2.3.1 Radiação Solar.....	18
2.3.2 Estrutura do dossel.....	19
2.3.2.1 Métodos diretos.....	20
2.3.2.2 Métodos indiretos.....	21
2.3.3 Produtividade Primária Líquida.....	24
2.3.4 Eficiência do Uso da Luz.....	26
2.4 Práticas silviculturais na restauração florestal.....	27
2.5 Abordagem ecofisiológica de modelos de restauração.....	28
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	30
3.1 Caracterização da área experimental.....	30
3.2 Delineamento Experimental.....	31
3.3 Balanço Hídrico.....	36
3.4 Medições dendrométricas.....	36
3.5 Biomassa e produtividade primária líquida de madeira.....	37
3.6 Índice de área de vegetação e foliar.....	40
3.6.1 Método indireto de determinação de índice de área de vegetação.....	40
3.6.2 Método direto destrutivo de determinação de índice de área foliar.....	42
3.6.3 Calibração do índice de área foliar.....	44
3.7 Fator de extinção de luz.....	45
3.8 Radiação fotossinteticamente ativa interceptada.....	46
3.9 Eficiência do uso da luz.....	47
3.10 Avaliação nutricional do dossel.....	48

3.11 Análises estatísticas.....	49
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	50
4.1 Clima.....	50
4.2 Crescimento de biomassa de madeira.....	53
4.3 Produtividade primária líquida de madeira.....	60
4.4 Índice de área foliar.....	76
4.5 Coeficiente de extinção de luz.....	85
4.6 Radiação fotossinteticamente ativa interceptada.....	88
4.7 Eficiência do uso da luz.....	93
4.8 Associação entre nitrogênio, área foliar e produtividade.....	98
5 CONCLUSÕES.....	104
REFERÊNCIAS.....	107

## RESUMO

### **Efeito de práticas silviculturais sobre a produtividade primária líquida de madeira, o índice de área foliar e a eficiência do uso da luz em plantios de restauração da Mata Atlântica**

Os objetivos do estudo foram identificar o melhor modelo de restauração pela manipulação da composição florística e práticas silviculturais, e compreender como este melhor desenvolvimento é explicado pelos fatores que controlam o uso e a eficiência do uso da luz pelo dossel florestal. Com esta fundamentação foi instalado em 2004, na Estação Experimental de Anhembi/ESALQ/USP, o ensaio “Modelos de restauração de áreas degradadas da Mata Atlântica visando o seqüestro de carbono”, com 20 espécies nativas e oito sistemas de restauração florestal, baseados em um delineamento fatorial  $2^3$ , com três fatores, e dois níveis por fator: i) Composição florística, com maior (67%) ou menor (50%) percentagem de pioneiras; ii) Espaçamento de plantio (3x1m e 3x2m); e iii) Manejo silvicultural, com manejo usual (maior estresse ambiental) e manejo máximo (minimização do estresse ambiental), referentes ao controle da matocompetição e fertilização. Em todos os tratamentos, até os 42 meses, foram determinados: produtividade primária líquida de madeira (PPLM), com base em inventários semestrais, determinação da densidade básica da madeira e fator de forma de todas as espécies, índice de área foliar (IAF, com calibração de fotos hemisféricas), radiação fotossinteticamente ativa interceptada (RFAI, de postos meteorológicos e o IAF), eficiência do uso da luz ( $EUL=PPLM/RFAI$ ) e o conteúdo de nitrogênio no dossel. Em relação ao fator Composição, as proporções de 50% ou 67% de pioneiras foram equivalentes, em todas as idades, para PPLM, IAF e EUL. Em relação ao fator Espaçamento, o plantio mais adensado (3x1m) propiciou maior estoque de biomassa aos 42 meses, comparativamente ao espaçamento 3x2m (13,0  $Mg.ha^{-1}$  versus 10,3  $Mg.ha^{-1}$ ), devido às suas maiores produtividades até os 24 meses. Porém, as PPLMs de ambos os espaçamentos não diferiram estatisticamente a partir dos 36 meses (5,5  $Mg.ha^{-1}ano^{-1}$ ). A maior produtividade do espaçamento 3x1m foi diretamente relacionada ao seu maior índice de área foliar entre os 36 e 42 meses, comparativamente ao espaçamento 3x2m (0,98  $m^2m^{-2}$  versus 0,71  $m^2m^{-2}$ ). Em relação ao fator Manejo, o manejo máximo proporcionou aumento de 4 vezes na biomassa de madeira aos 42 meses, comparativamente ao manejo usual (18,6  $Mg.ha^{-1}$  versus 4,6  $Mg.ha^{-1}$ ). Este maior estoque foi explicado por maiores IAFs (1,34  $m^2m^{-2}$  versus 0,34  $m^2m^{-2}$ ), levando a maiores produtividades primárias de madeira (8,5  $Mg.ha^{-1}ano^{-1}$  versus 2,4  $Mg.ha^{-1}ano^{-1}$ , aos 42 meses). A interação Espaçamento x Manejo foi significativa para as três variáveis de estudo: IAF, EUL, e PPLM, mostrando que as respostas dos espaçamentos 3x1m e 3x2m à aliviação do estresse ambiental são distintas, e que o espaçamento 3x2m requer uma silvicultura mais intensiva para expressar sua máxima produtividade. Finalmente, a PPLM mostrou-se altamente relacionada com o IAF no verão (36 meses) ( $r^2=0,96$ ), sendo que a incorporação do conteúdo de nitrogênio no dossel elevou ainda mais tal relação ( $r^2=0,99$ ), evidenciando o alto potencial de utilização destas duas variáveis como diagnóstico da qualidade e produtividade de florestas de restauração. Assim, para as condições deste estudo o melhor modelo seria: Composição com 50%:50% de pioneiras:não-pioneiras, espaçamento 3x2m, e necessariamente, manejo máximo, com controle da matocompetição das gramíneas (*Brachiaria decumbens*) e fertilização.

Palavras-chave: Restauração florestal; Mata Atlântica; Ecofisiologia; Produtividade primária líquida; Índice de área foliar; Eficiência do uso da luz

## ABSTRACT

### Effects of silvicultural practices on wood net primary production, leaf area index and light use efficiency of Atlantic Forest restorations

The purpose of this study was to identify the most appropriated restoration model by manipulating floristic composition and silvicultural practices, and to understand how the best development was explained by the factors that controls light use and light use efficiency at the canopy. A “Restoration models for Atlantic Forest disturbed lands aiming carbon sequestration” experiment was installed in 2004 using 20 Brazilian woody species and 8 forest restoration systems, in a factorial  $2^3$  design, with 3 factors and two levels per factor: i) Floristic composition with 67% and 50% of pioneer species; ii) Plant spacing (3x1m e 3x2m); and iii) Silvicultural management with usual (higher environmental stress level); and maximum (lower environmental stress level) silvicultural practices due to weed control and fertilization. Wood net primary production (WNPP), based on inventory surveys and wood density of all 20 species, leaf area index (LAI, with hemispherical pictures), absorbed photosynthetically active radiation (APAR, on meteorological stations and LAI), light use efficiency ( $LUE=WNPP/APAR$ ) and canopy nitrogen content was measured or estimated up to 42 months-old. The floristic composition proportion, with 50% and 67% of pioneers, were statistically equivalent, in all ages, for WNPP, LAI and LUE. The 3x1m spacing provided larger biomass stock at age of 42 months, comparatively to the 3x2m planting (13.0  $Mg\cdot ha^{-1}$  versus 10.3  $Mg\cdot ha^{-1}$ ), due a higher productivity until 24 months. However, WNPP of both spacing were equivalent after 36 months (5.5  $Mg\cdot ha^{-1}\cdot year^{-1}$ ). The higher productivity of the 3x1m spacing was directly related to its greater leaf area index comparatively to the 3x2m spacing (0.98  $m^2\cdot m^{-2}$  versus 0.71  $m^2\cdot m^{-2}$ ). The maximum silvicultural practices provided a 4-fold increase on wood biomass at age 42 months, comparatively to the usual practices (18.6  $Mg\cdot ha^{-1}$  versus 4.6  $Mg\cdot ha^{-1}$ ). This larger stock was explained by a higher LAI (1.34  $m^2\cdot m^{-2}$  versus 0.34  $m^2\cdot m^{-2}$ ) leading to higher WNPP (8.5  $Mg\cdot ha^{-1}\cdot year^{-1}$  versus 2.4  $Mg\cdot ha^{-1}\cdot year^{-1}$ , at 42 months). The Spacing x Management interaction was significant for LAI, LUE and WNPP, meaning that 3x2m and 3x1m spacing had distinct responses to environmental stress levels, showing that 3x2m depends on intensive silvicultural practices to express its maximum productivity. Finally, the WNPP was strongly related to LAI during summer months (at 36 months) ( $r^2=0,96$ ), and this relationship increased by the inclusion of canopy nitrogen content, showing that these two variables have a potential to be used to evaluate forest restoration quality and productivity. Thus, for the study conditions, the best model was: Composition 50%:50% of pioneer:non-pioneer species, 3x2m spacing, and the maximum silvicultural practices, with total weed control (*Brachiaria decumbens*) and fertilization.

Keywords: Forest restoration; Atlantic forest; Ecophysiology; Net primary production; Leaf area index; Light use efficiency

## 1 INTRODUÇÃO

O bioma Mata Atlântica é um dos mais biodiversos do mundo, e apresenta elevado grau de endemismos, sendo um dos biomas mais ameaçados por intervenções antrópicas dentre as regiões tropicais (FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA, 1992; MITTERMEIER et al., 1999). Esta destruição, de origem histórica, e que ocorre desde o descobrimento do país, fez com que restassem atualmente cerca de 7% do bioma original. Há portanto, grandes áreas do bioma Mata Atlântica em diversos estágios de degradação, e que necessitam de ações antrópicas visando sua restauração florestal. Tais restaurações são, no mínimo, necessárias para a recuperação das áreas de preservação permanente (APP) e reserva legal (RL) que devem existir em todas as propriedades rurais dentro do domínio deste bioma.

Estudos visando tais restaurações vêm sendo feitos, e, em sua maioria, estudam modelos de composição florística, visando sucessão secundária, e interações entre fauna e flora (RODRIGUES; LEITÃO-FILHO, 2000; KAGEYAMA et al., 2003). Embora tais estudos venham propiciando o melhor conhecimento das espécies nativas e modelos de composição, eles não possibilitam avaliar o potencial genético e ecofisiológico completo dessas espécies e modelos, pois os tratamentos silviculturais ficam, em geral, limitados às práticas tradicionais de preparo de solo, fertilização e controle de ervas daninhas, de baixo investimento. Assim, a avaliação do potencial produtivo dos modelos, dos fatores ambientais que limitam o crescimento da floresta em restauração, e dos processos ecofisiológicos responsáveis pelos melhores desenvolvimentos, dependem de estudos das práticas silviculturais de implantação e manejo dos sistemas de restauração.

Em áreas de restauração florestal, as práticas silviculturais adotadas têm como objetivo eliminar, ou minimizar, os estresses ambientais nutricionais, hídricos ou de competição, que sejam obstáculos ao desenvolvimento das árvores nos ambientes degradados (ENGEL; PARROTTA, 2003). Uma área com menor nível de estresse ambiental proporcionará maior desenvolvimento da floresta plantada, notadamente pela intensificação dos processos de fotossíntese e transpiração, os quais se intensificam

com o desenvolvimento da copa das árvores e seu estado fisiológico (HOLBROOK; LUND, 1995).

Uma das técnicas de caracterizar este desenvolvimento de copa e sua atividade fisiológica é a de avaliar a quantidade de radiação solar interceptada pelas folhas do dossel (uso da luz), e sua eficiência de uso, na forma de produção de biomassa pela floresta (ROSS, 1981). Assim, as folhas que compõe o dossel florestal interceptam a radiação fotossinteticamente ativa, e pelo processo de fotossíntese, convertem o carbono atmosférico absorvido ( $\text{CO}_2$ ) em fotoassimilados indispensáveis para a manutenção e crescimento da comunidade vegetal (LANDSBERG, 1986; HOLBROOK; LUND, 1995). A produtividade primária líquida das florestas e a radiação fotossinteticamente ativa interceptada pelo seu dossel estão diretamente relacionadas (CHAZDON et al., 1995) através do conceito de eficiência de uso da luz, o qual pode ser utilizado na predição das produtividades primárias líquidas de sistemas florestais (GOWER et al., 1999; GREEN et al., 2003; BINKLEY et al., 2004; STAPE et al., 2004a). Em plantios florestais, a associação da produtividade com a quantidade de radiação fotossinteticamente ativa interceptada foi demonstrada por vários autores (CANNELL, 1989), originando os modelos de eficiência produtiva, à semelhança da agricultura (MONTEITH, 1972).

Stape (2002) investigou tais conceitos com adequado desempenho em povoamentos de *Eucalyptus* em regiões tropicais. Por este modelo, o crescimento florestal é proporcional à radiação fotossinteticamente ativa interceptada pela copa das árvores (radiação utilizada), multiplicada pela eficiência do uso da luz pela floresta (unidade de biomassa produzida por unidade de luz utilizada; BINKLEY et al., 2004). Estes modelos dependem de uma adequada descrição da radiação incidente, do índice de área foliar e da arquitetura da copa (fator de extinção de luz) e, conseqüentemente, do total de radiação interceptada. Embora existam estudos para florestas naturais (CHEN et al., 1997), é limitado o conhecimento destes modelos para florestas tropicais plantadas de produção ou restauração (NAMBIAR; BROWN, 1997; CLARK et al., 2001a; STAPE, 2002; BASSET et al., 2003). Desta forma, estudos sobre a responsividade das espécies nativas às práticas silviculturais, no que se refere ao

desenvolvimento e processos fisiológicos da copa, são necessários para auxiliar na escolha de modelos de restauração adequados a cada situação sítio-específica.

Em geral, os estudos de restauração avaliam apenas o crescimento volumétrico das árvores, ou sua produção de biomassa. No entanto, a avaliação apenas do crescimento florestal, sem a caracterização dos processos responsáveis por tal efeito, não é completo, pois não permite identificar quais os mecanismos de crescimento que causaram tais respostas, impossibilitando diagnósticos em outras situações de restauração. Portanto, o entendimento das variáveis e processos determinantes no desenvolvimento das florestas, como o índice de área foliar e a dinâmica da radiação no dossel, são de crucial importância e devem ser avaliados (LANDSBERG, 2003).

Com esta fundamentação processual sobre o crescimento florestal em áreas de restauração, foi instalado em março de 2004, na Estação Experimental de Ciências Florestais de Anhembi – SP, o ensaio “Modelos de restauração de áreas degradadas da Mata Atlântica em dois locais do Brasil visando o seqüestro de carbono” (STAPE et al., 2006). Este estudo utiliza oito diferentes sistemas de restauração florestal, baseados em um delineamento que estuda a composição florística e as práticas silviculturais. O delineamento, num fatorial  $2^3$ , com três fatores, e dois níveis por fator, compreende: i) Fator composição florística, com maior (67%) ou menor (50%) percentagem de pioneiras no plantio, com 20 espécies nativas da região; ii) Fator espaçamento de plantio, com espaçamentos de 3 m x 1 m e 3 m x 2 m; e iii) Fator manejo silvicultural, com um manejo usual (e portanto, com maior nível de estresse ambiental) e um manejo máximo (menor nível de estresse ambiental), no tocante ao controle da matocompetição e da fertilização.

Em todos os tratamentos, e até os 42 meses, foram determinados a produtividade primária líquida de madeira (PPLM), o índice de área foliar (IAF), a radiação fotossinteticamente ativa interceptada (RFAI), e a eficiência do uso da luz ( $EUL = PPLM / RFAI$ ).

Assim, o objetivo deste estudo foi o de identificar qual o melhor modelo de restauração florestal quando se conjuga composição florística e práticas silviculturais, e compreender como este melhor desenvolvimento é explicado pelos fatores que

controlam o uso e a eficiência do uso da luz pelo dossel da floresta. Para tanto, do ponto de vista científico, foram testadas quatro hipóteses sobre tais processos, a saber:

- I. A composição florística com maior proporção de espécies pioneiras (67%) influenciará positivamente a produtividade primária de madeira (PPLM), o índice de área foliar (IAF) e a eficiência do uso da luz (EUL), face às características intrínsecas de crescimento acelerado das árvores pioneiras (KAGEYAMA; CASTRO, 1989).
- II. O espaçamento de plantio, com maior densidade de plantas (3 m x 1 m) elevará a produtividade primária de madeira (PPLM) e o índice de área foliar (IAF), pela ocupação mais rápida do sítio, porém com a mesma eficiência do uso da luz (EUL) (HENSKENS et al., 2001);
- III. As práticas silviculturais máximas elevarão a produtividade primária de madeira (PPLM), o índice de área foliar (IAF) e a eficiência do uso da luz (EUL), sendo que o ganho em EUL será superior ao ganho em IAF, devido à aliviação dos estresses ambientais e melhor estado fisiológico das copas (STAPE et al., 2004a); e
- IV. A produtividade primária de madeira (PPLM) será proporcional ao índice de área foliar (IAF) e seu estado fisiológico (nutricional e hídrico) (BEADLE, 1997).

## 2 DESENVOLVIMENTO

### 2.1 Mata Atlântica

No Brasil, o conjunto de ecossistemas conhecidos como Mata Atlântica (MA), inicialmente conglomerava apenas a vegetação densa e úmida da região costeira, mas após 1992, com a aprovação do CONAMA, estabeleceu-se o conceito de Domínio da Mata Atlântica. Segundo este conceito, o Domínio da Mata Atlântica abrange aproximadamente 1,3 milhão quilômetros quadrados, equivalentes a cerca de 15% do território brasileiro. Sua região de ocorrência original abrangia, parcial ou integralmente, atuais 17 Estados da Federação, do Ceará até o Rio Grande do Sul (INSTITUTO SOCIOAMBIENTAL, 2001).

Extremamente heterogêneo em sua composição, o domínio da Mata Atlântica (de 4 a 32° de Latitude Sul) cobre uma ampla variação de cinturões climáticos e formações vegetais tropicais e subtropicais (Floresta Ombrófila Densa, Floresta Ombrófila Mista, Floresta Ombrófila Aberta, Floresta Estacional Semidecidual, Floresta Estacional Decidual, manguezais, restingas, campos de altitude, brejos interioranos e encaves florestais do Nordeste) (FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA, 1992). A altitude varia entre 0 e 2.900 metros, com mudanças abruptas de tipo e profundidade do solo, e temperatura do ar (MANTOVANI, 2003). As precipitações ocorrem de forma abundante, com média anual de 1.000 mm, podendo atingir 4.000 mm em regiões da Serra do Mar (OLIVEIRA-FLHO; FONTES, 2000). O bioma MA, classificado como um dos 25 “hotspots” mundiais (áreas com excepcional número de espécies endêmicas e altas taxas de perda de habitat), possui aproximadamente 20.000 espécies de plantas vasculares, das quais 8.000 são endêmicas, representando 2,7% de todo o endemismo de plantas do planeta (MITTERMEIER et al., 1999).

A floresta ombrófila densa da faixa costeira apresenta uma vegetação diversificada e exuberante, devido à constante umidade vinda do oceano. As florestas ombrófilas mistas, onde ocorre a Araucária, distribuem-se sobre o Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná, enquanto as florestas decíduas e semi-decíduas estão localizadas a oeste das florestas ombrófilas, sendo constituídas por espécies

perenifólias e caducifólias, indo do Rio Grande do Sul a Minas Gerais com extensões no interior da Bahia e Piauí (GALINDO-LEAL; CÂMARA, 2005).

Liderando as estatísticas mundiais em termos de perda de habitat (GALINDO-LEAL; CÂMARA, 2005), a Mata Atlântica teve sua área reduzida de 1,3 milhão de quilômetros quadrados, em sua abrangência original, para apenas 98,8 mil quilômetros quadrados (7,6%) nos dias atuais (INSTITUTO SOCIOAMBIENTAL, 2001). Atualmente, áreas protegidas cobrem menos de 2% do bioma original, e as unidades de conservação de proteção integral protegem atualmente apenas 21% das florestas remanescentes (TABARELLI et al., 2005).

Nestas áreas, onde residem 70% dos habitantes do Brasil, é gerado cerca de 80% do Produto Interno Bruto (PIB) do país, criando uma enorme demanda por áreas de agricultura e para fins industriais. Os maiores processos de degradação da floresta Atlântica são advindos do comércio ilegal de madeira, desenvolvimento urbano e industrial, desmatamento movido pela agricultura e expansão de áreas de pastagem. Estes processos foram intensificados nos anos 60 com os incentivos fiscais ao desenvolvimento econômico do país (MITTERMEIER et al., 1999).

Assim, as pesquisas em Mata Atlântica visam basicamente restaurar áreas degradadas para que voltem a ter papel de relevância na conservação genética da flora e fauna nacionais, recompondo, no mínimo, as áreas de preservação permanente (APP) e de reserva legal (RL) em todas as propriedades rurais que ocorrem em seu domínio. Desta forma, quanto mais se souber sobre a biodiversidade da MA, sobre as ameaças que ela vem enfrentando e sobre o comportamento suas espécies submetidas a diferentes métodos e modelos de plantio, mais bem elaborados e conduzidos poderão ser os programas de conservação e restauração (GALINDO-LEAL; CÂMARA, 2005; STAPE et al., 2006).

## **2.2 Restauração Florestal**

O estado atual de devastação das florestas em regiões tropicais, e as grandes áreas degradadas, demonstram a necessidade urgente de intervenções para a reestruturação da biodiversidade e suas funções ecológicas (LAMB, 2005). Estima-se

que em todo o mundo mais de 350 milhões de hectares de florestas tropicais primárias e secundárias já foram desmatados, e outros 500 milhões de hectares foram severamente degradados (INTERNATIONAL TROPICAL TIMBER ORGANIZATION - ITTO, 2002).

No Brasil, as taxas de mudança de uso do solo, de florestas para outros usos, (principalmente agricultura) aumentaram de 0,5% ao ano no período de 1990 a 2000, para 0,6% ao ano no período de 2000 a 2005 (FAO, 2007). Apesar da boa estrutura e rigidez de nossa legislação florestal, e das melhorias nos meios de regulamentação e fiscalização, ainda ocorrem desmatamentos nas áreas de floresta atlântica *sensu lato* (FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA; INPE, 1993). Como consequência dessa degradação tem ocorrido perda da biodiversidade e da capacidade produtiva dos solos e ecossistemas, e degradação dos recursos hídricos (LAMB, 2005). Portanto, a necessidade de restauração dos ecossistemas degradados pela ação antrópica é premente.

Para Rodrigues e Gandolfi (2000), um estudo detalhado dos processos de degradação ocorridos ao longo dos anos permite constatar que a destruição dos ecossistemas naturais e o abandono de áreas antes ocupadas pela agricultura, têm avançado rapidamente, sem que se tenha aprendido com os erros cometidos. Para esses autores, a restauração de áreas degradadas é, portanto, uma consequência do uso incorreto da paisagem, sendo apenas uma tentativa limitada de remediar um dano que na maioria das vezes poderia ter sido evitado.

Existem casos em que os distúrbios causadores de degradação são pontuais, temporal e espacialmente, e há fontes de propágulos suficientes no entorno das áreas desmatadas (LAMB, 1998). Nessas situações, o processo de sucessão passa por diversos estágios de aumento no desenvolvimento estrutural e diversidade biológica, permitindo a restauração florestal através da sucessão ecológica (FINEGAN, 1996).

Porém, em ecossistemas que se apresentam em estágios avançados de degradação, barreiras físicas, químicas ou biológicas, ou condições severas e contínuas de estresse no ambiente, dificultam ou impedem os processos sucessionais naturais de ocorrerem em uma escala de tempo compatível com as necessidades humanas (PARROTTA, 1992; BROWN; LUGO, 1994; PARROTTA et al., 1997). As

condições de estresse mencionadas podem ser combinações de fatores, tais como: períodos de seca, queimadas periódicas, infestação excessiva de plantas invasoras e competição por recursos, tornando o ambiente desfavorável à germinação do banco de sementes e o estabelecimento de plântulas de espécies nativas regionais.

Atualmente, trabalhos têm demonstrado que o plantio de espécies florestais em áreas degradadas pode auxiliar na superação das barreiras que impedem a regeneração natural, exercendo “efeito catalítico” na sucessão secundária, facilitando a regeneração da vegetação nativa. Tais efeitos são caracterizados por mudanças microclimáticas do ambiente, desenvolvimento de camada de serapilheira e supressão de gramíneas invasoras (PARROTTA et al., 1997; LAMB, 1998; ENGEL; PARROTTA, 2001). Estudo recente demonstra que o “efeito catalítico” das plantações florestais é melhor observado em plantios mistos com espécies nativas, em comparação a plantios homogêneos ou comerciais (PARROTTA; KNOWLES, 2003).

Para que a restauração dos ecossistemas não se limite ao campo acadêmico, foram definidas por Engel e Parrotta (2003), as principais chaves do sucesso para a restauração ecológica:

- I. Definição clara dos objetivos da restauração (ecossistema alvo a ser atingido);
- II. Conhecimento do ecossistema a ser restaurado;
- III. Identificação das barreiras que impedem ou dificultam a regeneração natural; e
- IV. Integração entre restauração ecológica e desenvolvimento rural.

Os autores ressaltam que é necessário também que os ecossistemas restaurados sejam capazes de se auto-perpetuarem, sem a necessidade de intervenções futuras. Para isso, o conhecimento aprofundado da estrutura e do funcionamento dos ecossistemas tropicais, bem como dos processos ecológicos fundamentais para a sua estabilidade, são essenciais para o sucesso de tais ações. Ainda, é importante salientar que precauções devem ser tomadas de modo a garantir que os distúrbios que levaram a degradação não ocorram novamente durante o processo de restauração (LAMB; TOMLINSON, 1994).

Atualmente existem trabalhos que descrevem diversas metodologias utilizadas na restauração florestal. Engel e Parrotta (2001) realizaram a semeadura direta de

cinco espécies de início de sucessão, em três áreas degradadas, caracterizadas por tipos de solo distintos e diferentes históricos de uso do solo. Foi observado que a despeito do baixo desempenho de algumas espécies testadas, pode-se concluir que a regeneração natural de espécies nativas oriundas de fragmentos florestais próximos foi significativamente maior nas áreas onde foi realizada a semeadura direta, em comparação a parcelas sem semeadura.

Reis e Kageyama (2003) discorrem sobre a importância de interações interespecíficas para a restauração de áreas degradadas. Afirmam que chegar o mais próximo possível do ecossistema original significa trazer novamente ao ambiente, todas, ou a maior parte das espécies e suas interações. Para isso discutem sobre critérios de seleção de espécies e as interações planta-planta, planta-microorganismo e planta-animal, bem como níveis de interações, polinização e dispersão de sementes, afirmando que a interdependência das espécies em comunidades tropicais representa uma grande ferramenta nos processos de restauração, desde que bem conhecidos e acompanhados.

Na abordagem de plantações florestais como catalisadoras da regeneração natural, devemos considerar que as árvores formam apenas o esqueleto estrutural das florestas, e que as comunidades de epífitas, lianas, arbustos e ervas deverão ser capazes de colonizar a área plantada aumentando a diversidade de nichos, para a colonização concomitante da fauna (ENGEL; PARROTTA, 2003).

Apesar de os estudos descritos anteriormente serem de grande relevância para a ciência da restauração florestal, eles enfocam composição florística, semeadura ou plantio de espécies arbóreas e suas interações com outras ordens vegetais ou fauna. Tais abordagens limitam os métodos de restauração ao manejo silviculturais usual como, coveamento, adubação de base e controle manual simples de plantas invasoras. Esta abordagem limita a capacidade de avaliar o potencial produtivo dos plantios florestais, suas interações com as práticas silviculturais. Além disso, não possibilitam compreender os processos ecofisiológicos que controlam o desenvolvimento das florestas, em termos de estrutura de copa e utilização da radiação pelo dossel.

Com esta fundamentação, Stape et al. (2006) desenvolveram estudos de restauração florestal que não só avaliam fatores como composição florística e

espaçamento de plantio, mas também, o fator manejo do povoamento, onde são empregadas práticas silviculturais intensivas, de preparo de solo, fertilização e controle de plantas invasoras, visando reduzir o estresses ambientais, como uma tentativa de auxiliar no estabelecimento e desenvolvimento dos plantios, acelerando os processos ecológicos que levam à restauração de áreas degradadas.

## **2.3 Ecofisiologia Florestal**

Estudos sobre a radiação solar e a produtividade de ecossistemas vegetais iniciaram-se com Monteith (1972), que observou uma relação linear positiva entre a produção de biomassa de culturas agrícolas e a radiação interceptada. Posteriormente a mesma relação foi observada por Cannell (1989) para espécies florestais. Atualmente esta relação é bastante explorada para avaliar a eficiência com que as plantas utilizam a radiação que interceptam (GOWER et al., 1999; SINCLAIR; MUCHOW, 1999; STAPE et al. 2008). Portanto, o modo como a radiação solar é interceptada e sintetizada pelas plantas é de grande importância para estudos ecofisiológicos, pois atua diretamente sobre os processos que controlam a produtividade.

Como descrito em Lowman e Nadkarni (1995) a grande maioria dos processos que estão envolvidos diretamente com o crescimento e desenvolvimento das florestas, como interceptação e assimilação da radiação, trocas gasosas de água e CO<sub>2</sub> e síntese de fotoassimilados ocorrem nas copas das árvores, ou seja, no dossel florestal.

Assim, as variáveis ambientais (radiação), da floresta (índice de área foliar) e suas interações, devem ser estudadas e compreendidas para o estabelecimento de métodos diagnósticos de avaliação e recomendação em sistemas de restauração.

### **2.3.1 Radiação Solar**

Apenas 47% da radiação solar incidente no topo da atmosfera (comprimento de onda entre 290 e 3000 nm) atinge a superfície do planeta. Esta redução é causada por inúmeros fatores como refração, difração e absorção por gases ou partículas suspensas no ar. Ao atingir a superfície, a chamada de radiação global, é composta por radiação

solar direta e luz difusa, sendo que cerca de 45 a 50% está compreendida dentro de uma escala espectral de 380 – 710 nm, que é utilizada pela fotossíntese (Radiação Fotossinteticamente Ativa, RFA) (LARCHER, 2006).

Na superfície das folhas do dossel, a radiação pode tomar diversos caminhos. De forma simplificada, pode ocorrer reflexão de forma direta ou difusa, absorção por pigmentos, água e outros constituintes da folha, ou transmissão através da folha (ASNER; WESSMAN, 1997). A maior parte da radiação que penetra na folha é absorvida, e em sua passagem por sucessivas camadas, a radiação decresce exponencialmente. Dependendo da estrutura da folha e da quantidade de cloroplastos nos tecidos do mesófilo, as folhas absorvem de 60 a 80% da RFA (LARCHER, 1995).

Inicialmente estudos da interceptação, absorção e transmitância da radiação solar pelo dossel eram teóricos e distantes de aplicações práticas. Os pioneiros neste campo de pesquisa foram Monsi e Seaki (1953), citados por Landsberg (2003), mostrando que a penetração e absorção da radiação pelo dossel, podiam ser descritas pela Lei de Lambert-Beer. Posteriormente, Norman e Jarvis (1975) apresentaram grandes avanços teóricos relacionados ao estudo da atenuação da radiação exercida pelo dossel. Tais estudos avaliaram a influência da distribuição angular dos raios solares incidentes, a densidade e distribuição dos elementos no interior do dossel (troncos, galhos e folhas) e também sua interação com as condições atmosféricas. Monteith (1977) também contribuiu significativamente ao estudar a relação entre a radiação solar absorvida pelo dossel e a produção de biomassa, possibilitando a esse campo de pesquisa maior aplicabilidade. Atualmente, existem modelos ecofisiológicos que tem como base teórica a interceptação da RFA pelas folhas do dossel (WANG, 1990; LANDSBERG; WARING, 1997).

### **2.3.2 Estrutura do dossel**

A descrição da estrutura do dossel é essencial para o entendimento dos processos que governam o desenvolvimento florestal, devido a sua profunda influência nas interações planta-ambiente. A arquitetura da vegetação não afeta apenas as trocas de massa e energia entre a planta e o seu ambiente, mas também revela estratégias de

crescimento e desenvolvimento. Infelizmente, descrições quantitativas de características geométricas do dossel são difíceis devido a sua variabilidade espacial (horizontal e vertical) e temporal (NORMAN; CAMPBELL, 1992). Uma descrição detalhada da estrutura de um dossel deve incluir tamanho, forma, área, orientação e distribuição das posições dos vários compartimentos das plantas que o compõe, principalmente folhas.

Na década de 40 o índice de área foliar (IAF) foi definido por Watson (1947) como a área fotossintética, de um lado da folha, por unidade de superfície de solo, sendo um valor adimensional (CHEN; BLACK, 1992). É uma importante variável, pois representa a interface ativa entre a atmosfera e o ecossistema, e controla os processos de fotossíntese, interceptação da precipitação e evapotranspiração. Qualquer mudança no IAF do dossel (por tempestades, secas, pragas e doenças ou práticas de manejo) é acompanhada por modificações na produtividade do povoamento (BRÉDA, 2003). O IAF é utilizado como parâmetro de entrada em um grande número de modelos ecofisiológicos que simulam ciclos de carbono e água (WANG, 1990; LANDSBERG; WARING, 1997).

Trabalhos recentes sobre determinação de IAF têm sido baseados em duas metodologias (NORMAN; CAMPBELL, 1992): i) Métodos diretos, que requerem coleta de amostras, são destrutivos e bastante trabalhosos, aplicados geralmente em culturas agrícolas e pastagens, devido a sua altura; ii) Métodos indiretos, que envolvem a avaliação do comportamento da radiação no dossel, sendo amplamente utilizados em florestas devido a limitações causadas pela dificuldade de acesso as copas.

### **2.3.2.1 Métodos diretos**

O IAF pode ser determinado diretamente, de forma destrutiva por meio de amostragem de material vegetal, pelo método da “árvore modelo”, ou de forma não destrutiva utilizando coletores de serapilheira. Tais métodos apresentam grande exatidão, e por essa razão são freqüentemente implementados como ferramentas de calibração para os métodos indiretos. Porém tem a desvantagem de serem

extremamente trabalhosos e demandarem muito tempo em sua execução (JONCKHEERE et al., 2004).

Métodos diretos envolvem a mensuração da área foliar, utilizando um medidor de área foliar, como o LI 3100 (LI-COR, NE, EUA), após a coleta do material em campo, ou uma relação específica de suas dimensões (largura e comprimento) com sua área via um coeficiente de forma. A área foliar é medida em uma sub-amostra de folhas e relacionada com a massa seca (por meio da área foliar específica, AFE,  $\text{m}^2\text{kg}^{-1}$ ), finalmente, a massa total de folhas coletadas dentro de uma superfície de solo conhecida é convertida em IAF, multiplicando-se pela AFE. É crucial realizar a amostragem de folhas corretamente para estabelecer a relação entre área e massa de folhas devido às mudanças existentes entre espécies e entre sítios para uma dada espécie e época do ano (BRÉDA, 2003).

### **2.3.2.2 Métodos indiretos**

Métodos indiretos inferem sobre o índice de área foliar a partir de medições da radiação transmitida através do dossel, fazendo uso da teoria da transferência de radiação descrita em Ross (1981). Tais métodos não são destrutivos e estão baseados em abordagens estatísticas e probabilísticas, da distribuição e arranjo dos elementos foliares no dossel.

Esses métodos aplicam a lei de Lambert-Beer que leva em conta o fato de que a quantidade total de radiação interceptada pelos estratos do dossel depende das condições atmosféricas, da radiação incidente, e da estrutura e propriedades ópticas do dossel (CAMPBELL; NORMAN, 1997).

Na realidade, métodos indiretos não medem índice de área foliar, pois todos os elementos do dossel que interceptam a luz são incluídos, portanto os termos índice de área de planta (IAP), índice de área de vegetação (IAV) ou índice de área de superfície (IAS) são mais indicados, caso nenhuma correção seja realizada. Para tal propósito métodos diretos podem ser implementados (BRÉDA, 2003; JONCKHEERE et al., 2004).

A equação de Lambert-Beer expressa a atenuação da radiação em um meio turbido homogêneo, onde o fluxo é absorvido proporcionalmente à distância óptica. O método de determinação do índice de área de vegetação (IAV) pela inversão da equação de Lambert-Beer assume distribuição aleatória das folhas e requer medições de radiação incidente ( $I_0$ ) e transmitida ( $I$ ), como na eq. (1):

$$I = I_0 e^{(-k \cdot IAV)} \quad \text{portanto,} \quad IAV = -1/k \ln(I/I_0) \quad (1)$$

onde  $I_0$  é a radiação incidente,  $I$  é a radiação transmitida abaixo do dossel,  $k$  é o coeficiente de extinção de luz e  $IAV$  é o índice de área de vegetação.

O coeficiente de extinção de luz representa a área de sombra feita pelo dossel, distribuída em uma superfície horizontal, dividida por sua área de folhas; ou a média da projeção de folhas em uma superfície horizontal (MONTEITH, 1975). Este coeficiente deve ser determinado para cada situação, por ser espécie e sítio específico, devido ao ângulo, formato e sobreposição de folhas (JONCKHEERE et al., 2004).

Atualmente, existem alguns equipamentos que são utilizados para a avaliação do dossel de florestas. Dentre eles podemos citar o ceptômetro PAR-80 (AccuPAR, Decagon Devices, Pullman, EUA) e o LAI-2000 (Li-Cor, Lincoln, Nebraska, EUA). Com as medições de radiação feitas por estes equipamentos pode-se obter o IAV diretamente ou por meio da resolução da equação de Lambert-Beer. As descrições a seguir são baseadas em Bréda (2003), Fassnacht et al. (1994) e Hyer e Goetz (2004).

O ceptômetro é um aparelho portátil que usa um microprocessador e 80 sensores quânticos distribuídos ao longo de uma sonda, para medir RFA (400-700 nm). O valor mostrado é a média das medições de todos os sensores, porém sabe-se que a sonda pode fazer medições de forma segmentada. Devido à heterogeneidade do ambiente luminoso abaixo do dossel e da pequena área amostrada, as medições devem ser feitas em vários pontos, em grande número e de forma adequada, para poder descrever o dossel com exatidão.

O LAI-2000 faz medições simultâneas, de radiação difusa por meio de um sensor do tipo “olho-de-peixe” (*fish-eye*), em cinco ângulos distintos a partir do zênite (7, 23, 38, 53 e 68°). As medições devem ser realizadas interna e externamente ao

povoamento. Existe um filtro interno que rejeita radiação incidente acima de 490 nm para minimizar captação da radiação dispersa pelo dossel, de modo a capturar o máximo contraste entre as folhas e o céu. A razão entre estes dois valores resulta no IAV estimado. Devido a relativamente grande região amostrada pelo aparelho, um número pequeno de medições já é suficiente para as estimativas do IAV.

Estes equipamentos medem o ambiente de radiação transmitida através do dossel e usam estes valores para os cálculos de IAV.

Além dos sensores de radiação para determinação do IAV, um método que está recebendo grande atenção é o de fotografias hemisféricas (Figura 1), devido a sua habilidade única de gravar permanentemente as características espectrais e espaciais de todos os elementos do dossel, como clareiras, IAV e transmitância da luz (FRAZER et al., 2001). Sendo assim tais fotografias podem ser analisadas novamente conforme os métodos vão sendo aprimorados.



Figura 1 - Fotografias hemisféricas do dossel de um plantio florestal de restauração de Mata Atlântica, com três anos de idade (STAPE et al., 2006)

Basicamente, fotografia hemisférica é uma técnica de estudo do dossel vegetal por meio de fotos adquiridas através de uma lente olho-de-peixe (*fish-eye lens*), posicionada abaixo do dossel e direcionada ao zênite, geralmente fornecendo um campo de visão extremo, de aproximadamente 180° (JONCKHEERE et al., 2004). No momento da aquisição das fotos devem-se tomar alguns cuidados, como fazer o nivelamento e o ajuste adequado das configurações da máquina, visando maximizar o

contraste entre o céu e os componentes do dossel. Como descrito por Zhang et al. (2005), o tempo de exposição utilizado para a aquisição das fotografias hemisféricas é essencial para a obtenção de resultados confiáveis, visto que este fator é uma grande fonte de erro.

Com as imagens devidamente preparadas para a interpretação, existem programas computacionais desenvolvidos para esta finalidade. Dentre eles destaca-se o *Hemisfer* (SCHLEPPI et al., 2007). No programa *Hemisfer* 1.41, o IAV é calculado pela distribuição de clareiras no dossel, utilizando anéis concêntricos que cobrem toda a fotografia. Utilizando um método automático (NOBIS; HUNZIKER, 2005), o programa diferencia os *pixels* referentes ao céu dos referentes ao dossel, estes valores são integrados para todos os anéis resultando no IAV de determinada imagem. Existem ainda, outros programas desenvolvidos para a interpretação de fotos como o Gap Light Analyser (FRAZER et al., 1999) e o *CAN-EYE* (CAN-EYE, 2006).

### **2.3.3 Produtividade Primária Líquida**

A produtividade primária líquida de uma floresta é definida como a diferença entre a fotossíntese total (produtividade primária bruta) e a respiração autotrófica de um ecossistema (RYAN, 1991). No entanto, não é possível mensurar a produtividade primária líquida em termos desta diferença, pois a produtividade primária bruta não pode ser determinada diretamente, e a estimativa da respiração na escala do ecossistema ainda é complicada e envolve grandes incertezas (RYAN, 1991; LARCHER, 1995).

A produtividade primária líquida representa aproximadamente 50% do carbono assimilado pelo dossel florestal durante o processo de fotossíntese, sendo um importante componente no balanço de carbono do ecossistema (LANDSBERG; GOWER, 1997). Apesar de existirem diversos estudos sobre produtividades primárias em florestas tropicais (CLARK et al., 2001b), ainda há confusão teórica em relação a este termo.

Uma definição alternativa para a produtividade primária líquida é a matéria total produzida, ao longo de um determinado período de tempo. No entanto, esta produção

não pode ser diretamente mensurada devido ao consumo por herbivoria e decomposição do material orgânico durante o período de estudo. Por tais fatores, é conceitualmente útil adotar a definição utilizada em Clark et al. (2001b) onde a produtividade primária líquida é estimada com avaliações de campo.

De acordo com tal definição, a produtividade primária líquida compreende todos os materiais que juntos representam: 1) a quantidade de matéria seca nova que foi mobilizada pelas plantas vivas no final do período de avaliações e 2) a quantidade de matéria seca produzida e perdida pelas plantas durante o mesmo período. Em florestas estes materiais são: incremento de biomassa acima do solo, produção de serapilheira, perda acima do solo para consumidores (herbivoria), emissões de compostos orgânicos voláteis, incrementos líquidos de biomassa em raízes (grossas e finas), raízes mortas (grossas e finas), perda de raízes por consumidores, e exudatos das raízes, entre outros (CLARK et al., 2001b).

Altas taxas de produtividade primária líquida são limitadas a regiões que proporcionam às plantas uma combinação favorável de água, temperatura e nutrientes. Cramer et al. (1999) avaliou dezessete modelos biogeoquímicos e determinou que globalmente a produtividade primária líquida varia em média de 100 a mais de 1200 g C m<sup>2</sup> ano<sup>-1</sup>, sendo a área do domínio da Mata Atlântica caracterizada como altamente produtiva com valores variando entre 1100 e 1200 g C m<sup>2</sup> ano<sup>-1</sup>.

Apesar do grande conhecimento acumulado sobre a produtividade primária líquida de florestas, Gower et al. (2001) conclui que até mesmo os estudos mais completos apresentaram resultados falhos por não contabilizarem a alocação do carbono para todos os componentes do ecossistema (micorrizas, produção de raízes finas e herbivoria). Quando a escala de estudo engloba todo um ecossistema florestal podem existir diversas fontes de erro. Clark et al. (2001b) faz referência a mais de vinte possíveis fontes de erro em estimativas de PPL de florestas tropicais por falhas metodológicas ou exclusão de alguns componentes.

Contudo, para florestas plantadas, onde a complexidade do sistema é menor devido ao reduzido número de espécies, pode-se modificar a escala de estudo por meio de uma abordagem mais simples. Assim, como tentativa de eliminar algumas dessas fontes de erro, pode-se restringir o estudo a apenas um componente da floresta como a

produtividade primária líquida de madeira (PPLM), visando obter resultados mais confiáveis.

#### **2.3.4 Eficiência do Uso da Luz**

O conceito de eficiência do uso dos recursos é de grande importância para estudos relacionados à ecofisiologia florestal (BINKLEY et al., 2004), e teve início com Monteith (1972), que mostrou uma relação linear positiva entre produtividade de culturas agrícolas e o índice de área foliar, ou a radiação fotossinteticamente ativa interceptada (RAFI). Posteriormente, o conceito foi ampliado para estudo sobre eficiência do uso de nutrientes pelas plantas (VITOUSEK, 1982). Pastor e Bridgham (1999) evidenciaram a importância conceitual do termo, ressaltando que eficiência do uso de nutrientes (produção por unidade de recurso absorvido) deve ser diferenciada de eficiência de resposta aos nutrientes (produção por unidade de nutriente disponível), pois existem muitos erros na literatura provenientes de interpretações equivocadas e de base teórica.

Recentemente Binkley et al. (2004) publicaram uma ampla discussão sobre a eficiência do uso de recursos em florestas, conceituando diversos termos freqüentemente relacionados a produção florestal e ao uso dos recursos.

Devido a sua simplicidade, a eficiência do uso da luz (EUL) ou o modelo épsilon ( $\epsilon$ ) é amplamente utilizado em estudos sobre produtividade primária líquida de ecossistemas florestais, com importantes aplicações para modelos ecofisiológicos, como realizado por Stape et al. (2004a) em plantações de *Eucalyptus grandis* x *urophylla* no Brasil.

Muitos estudos têm sido feitos visando o entendimento dos fatores que afetam a EUL, como estresse hídrico, a nutrição do solo e a temperatura ambiente. Runyon et al. (1994) avaliaram a influência de limitações climáticas (secas, déficit de umidade do ar e geadas) na produtividade primária líquida de florestas do Oregon por meio do modelo  $\epsilon$ , encontrando modificações nos padrões de distribuição de carbono na planta. Ocorreu maior alocação para as raízes quanto mais limitante o ambiente se tornava, reduzindo a produtividade primária líquida da parte aérea em até 40%. Ahl et al. (2004),

em estudo no nordeste de Wisconsin, quantificaram a variabilidade da EUL em diferentes fisionomias florestais, comparando ao longo de dois anos e relacionando com diversas condições ambientais. Em ambos os anos avaliados (1999 e 2000) houve aumento da EUL durante a estação de crescimento, com diferença significativa entre as fisionomias florestais estudadas.

Apesar da ampla utilização da EUL como abordagem para estudos de produtividade, deve-se estar atento a possíveis fontes de erro que levam a interpretações equivocadas (GOWER et al., 1999). Alterações na EUL têm sido relatadas resultantes de diversos fatores intrínsecos e extrínsecos incluindo, espécies, processo fotossintético, trocas gasosas e concentração de nutrientes nas folhas (principalmente nitrogênio), disponibilidade de recursos no solo, déficit de pressão de vapor atmosférico, temperatura e radiação solar (SINCLAIR; MUCHOW, 1999).

Para ampliar o entendimento de como as plantas utilizam a radiação, alguns autores propõem integrar aos estudos de EUL, o grau de influência dos nutrientes, aumentando a capacidade de avaliar as respostas ecofisiológicas das plantas ao ambiente (DEWAR, 1996; HEXALTINE; PRENTICE, 1996; GREEN et al., 2003).

## **2.4 Práticas silviculturais na restauração florestal**

Ambientes submetidos a altos níveis de degradação apresentam barreiras físicas, químicas ou biológicas que impedem fortemente os processos sucessionais naturais (PARROTTA et al., 1997). No entanto, plantios florestais com espécies nativas podem romper parcialmente tais barreiras auxiliando o processo de regeneração natural (ENGEL; PARROTTA, 2001). Contudo, depois de realizado o plantio, as variações climáticas e edáficas existentes em áreas altamente degradadas submetem as plantas a altos níveis de estresse térmico, hídrico, nutricional ou biológico, reduzindo sua vitalidade e dificultando seu estabelecimento em campo (LARCHER, 2006).

Segundo Larcher (2006) a dinâmica do estresse em plantas consiste de três fases: i) Fase de alarme, quando os impactos dos fatores estressantes desestabilizam estruturas e funções; ii) Fase de resistência, quando a exposição ao fator estressante é prolongado e altos níveis de resistência são desenvolvidos podendo resultar em re-

estabilização; e iii) Fase de exaustão, quando ocorrem danos irreversíveis aos tecidos e as plantas morrem.

Com o intuito de reduzir ou eliminar as condições de estresse impostas pelo ambiente, práticas silviculturais similares às aquelas aplicadas em florestas plantadas monoespecíficas podem ser uma ferramenta importante para aumentar o grau de sucesso em sistemas de restauração (IANNELLI-SERVIN, 2007). Assim, o manejo intensivo, com preparo de solo adequado, controle de matocompetição, controle de pragas, adubações complementares, espaçamento de plantio ótimo e composição florística apropriada podem favorecer as espécies nativas plantadas em detrimento das gramíneas invasoras, disponibilizando grandes quantidades de recursos, aliviando o estresse do ambiente, resultando no sucesso do estabelecimento e perpetuação da floresta plantada de restauração (STAPE et al., 2006).

## **2.5 Abordagem ecofisiológica de modelos de restauração**

Para que se possa avaliar o sucesso no estabelecimento e desenvolvimento de plantios florestais, com o objetivo de restauração, não basta estudar apenas o crescimento em diâmetro e altura das árvores plantadas. Para isto, há a necessidade de estudos sobre variáveis ecofisiológicas que forneçam subsídios para o entendimento dos processos que controlam o crescimento das árvores levando-as a superarem os estresses nos ambientes degradados (ENGEL; PARROTTA, 2003).

Visto que os principais processos fisiológicos responsáveis pelo desenvolvimento de florestas acontecem nas folhas que compõem o dossel (HOLBROOK; LUND, 1995; BASSET et al., 2003), é essencial estudar a dinâmica do índice de área foliar, o comportamento da radiação solar no dossel, e a eficiência com que as árvores utilizam esta radiação. Uma área com menor estresse proporciona maior crescimento devido a intensificação dos processos de fotossíntese e transpiração, que dependem da copa e de seu status fisiológico (HOLBROOK; LUND, 1995).

A caracterização do desenvolvimento da copa e sua atividade fisiológica podem ser feitas pela quantificação do índice de área foliar, da quantidade de radiação solar

interceptada pela copa (uso da luz), e da sua eficiência de uso, na forma de produção de biomassa pela floresta (ROSS, 1981).

Neste trabalho, tais estudos foram realizados em ensaio de restauração de Mata Atlântica semi-decídua, plantada em março de 2004, com 20 espécies nativas locais, na Estação Experimental de Ciências Florestais de Anhembi-SP, em área de pastagem degradada. Testou-se composição florística conjuntamente com técnicas silviculturais, avaliando-se a produtividade primária líquida de madeira e os aspectos ecofisiológicos envolvidos, até a idade de 42 meses.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Caracterização da área experimental

O experimento faz parte do projeto “Modelos de recuperação de áreas degradadas da Mata Atlântica com espécies nativas em duas regiões do Brasil visando seqüestro de carbono” (STAPE et al., 2006), resultado de um convênio entre ESALQ/IPEF e Petrobras – Petróleo Brasileiro S.A.

O estudo foi conduzido na Estação Experimental de Ciências Florestais de Anhembi - SP, pertencente à Universidade de São Paulo. Localizada a 22° 47' de latitude Sul, 48° 09' de longitude Oeste e 500 m altitude. O clima local é mesotérmico (Cwa), segundo a classificação de Köppen, com verões quentes e chuvosos e invernos moderadamente frios e secos. A precipitação média anual é de 1350 mm, com pequeno déficit hídrico nos meses secos (abril a setembro). A temperatura média anual é de 21,0°C, sendo a média do mês mais frio 17,1°C e a média do mês mais quente 23,7°C.

A Estação Experimental situa-se dentro da área de domínio do Bioma Mata Atlântica (Floresta Mesófila Semidecidual) (CESAR, 1988), com relevo plano (máximo de 2% de declividade). O solo predominante é classificado como Latossolo Amarelo Distrófico (EMBRAPA, 1999), contendo 5% de silte, 13% de argila e 82% de areia. Na Tabela 1 está apresentada a análise química do solo da área experimental.

Tabela 1 – Composição química do solo da área experimental em Anhembi, na profundidade de 0-20 cm.

Profundidade	P	S-SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	M.O.	pH	K	Ca	Mg	H+Al	Al	SB	T	V
cm	mg dm <sup>-3</sup>		g dm <sup>-3</sup>	CaCl <sub>2</sub>	mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>							%
0-20	4	2	13	4,0	1,1	4	3	34	15	8	42	18

As características químicas do solo foram determinadas no Laboratório de Ecologia Aplicada do Departamento de Ciências Florestais da ESALQ/USP

A instalação do projeto ocorreu em março de 2004, em área de pastagem de *Brachiaria decumbens*. A eliminação desta gramínea foi realizada, de forma mecanizada, aplicando-se herbicida (princípio ativo glifosate) em área total, na dose de 7 L ha<sup>-1</sup> do produto comercial Round Up®, e o preparo de solo foi realizado com um

subsolador DMB, a 60 cm de profundidade, com distância de 3 metros entre as linhas de preparo. O controle de formigas cortadeiras, dos gêneros *Atta* e *Acromyrmex*, foi feito de forma sistemática em ambos os tratamentos, semestralmente, com isca formicida a base de sulfluramida.

As mudas para plantio foram produzidas no Viveiro Camará (Ibaté, SP), em tubetes de prolipropileno com 50 cm<sup>3</sup>, com idades variando de 120 a 180 dias, na data de plantio.

### 3.2 Delineamento Experimental

O ensaio possui delineamento fatorial completo 2<sup>3</sup>, com três fatores de estudo, e dois níveis de cada fator, totalizando oito tratamentos, e 4 repetições, em blocos casualizados, totalizando 32 parcelas experimentais. Há ainda quatro parcelas adicionais, chamadas destrutivas, que foram implantadas para servirem de fonte de material para quantificação de biomassa.

Cada parcela possui 1260m<sup>2</sup> (42 m x 30 m) de área total, e 792 m<sup>2</sup> (36 m x 22 m) de área útil onde são realizadas as avaliações. As linhas de bordadura existem para evitar que determinado tratamento aplicado a uma parcela interfira na parcela vizinha.

Os três fatores de estudo são:

- i) Composição florística, doravante denominada apenas **Composição**, utilizando 20 espécies nativas de ocorrência regional (ASSUNÇÃO et al., 1982; CESAR, 1988);
- ii) Espaçamento de plantio, doravante denominado apenas **Espaçamento**, variando a distância de plantio entre as árvores na linha, para uma distância fixa entre as linhas de 3 m; e
- iii) Manejo silvicultural, doravante denominado apenas **Manejo**, e referente à intensidade dos tratos culturais de controle de ervas daninhas e adubação aplicada nas parcelas.

Os dois níveis de cada um destes fatores foram definidos na tentativa de obter variação nas taxas de crescimento das florestas em restauração. Assim, para o fator Composição, os dois níveis foram:

**50:50** – Representa um plantio misto, em que, na parcela total e útil, 50% dos indivíduos são de espécies pioneiras ou secundárias iniciais (ditas pioneiras) e os outros 50% são de espécies secundárias tardias e climácicas (ditas, não pioneiras); e

**67:33** – Representa um plantio misto, em que, na parcela total e útil, 67% dos indivíduos são de espécies pioneiras ou secundárias iniciais (ditas pioneiras) e os outros 33% são de espécies secundárias tardias e climácicas (ditas, não pioneiras);

As espécies utilizadas, e sua classificação sucessional, de acordo com referências da literatura estão apresentadas na Tabela 2.

A localização das espécies em cada parcela foi feita de forma aleatória no bloco 1 e replicada nos demais, sendo que a classificação sucessional nas linhas de plantio seguiu a seqüência Pioneira:Não-Pioneira no nível 50:50, e Pioneira:Pioneira:Não-Pioneira no nível 67:33.

Tabela 2 – Relação das 20 espécies nativas utilizadas no ensaio, com sigla, nome popular, científico e família botânica. Indica-se ainda a classificação das mesmas em grupos sucessionais, em pioneira (P) e não pioneira (NP) de acordo com a literatura.

Siglas	Nome popular	Nome científico	Família	P	NP	Literatura
AL	Algodoeiro	<i>Heliocarpus americanus</i>	Tiliaceae	X		Lorenzi (1992)
AP	Aroeira Pimenta	<i>Schinus terebinthifolia</i>	Anacardinaeae	X		Durigan et al. (2002)
SD	Sangra D'água	<i>Croton urucurana</i>	Euphorbiaceae	X		Durigan et al. (2002)
AM	Amendoim Bravo	<i>Pterogyne nitens</i>	Caesalpinioideae	X		Carvalho (1994)
CF	Canafístula	<i>Peltophorum dubium</i>	Caesalpinioideae	X		Carvalho (1994)
ML	Mulungu	<i>Erythrina mulungu</i>	Papilionoideae	X		Lorenzi (1992)
MO	Monjoleiro	<i>Acacia polyphylla</i>	Mimosoideae	X		Lorenzi (1992)
MT	Mutambo	<i>Guazuma ulmifolia</i>	Malvaceae	X		Lorenzi (1992)
TI	Timburi	<i>Enterolobium contortisiliquum</i>	Mimosoideae	X		Carvalho (1994)
AC	Açoita Cavalo	<i>Luehea divaricata</i>	Tiliaceae	X		Durigan et al. (2002)
JA	Jacaranda	<i>Jacaranda cuspidifolia</i>	Bignoniaceae		X	Lorenzi (1992)
DE	Dedaleiro	<i>Lafoensia pacari</i>	Lythraceae		X	Durigan et al. (2002)
FB	Fiqueira Branca	<i>Ficus guaranítica</i>	Moraceae		X	Lorenzi (1992)
CE	Cedro Rosa	<i>Cedrela fissilis</i>	Meliaceae		X	Carvalho (1994)
LA	Lapacho	<i>Poecilanthe parviflora</i>	Papilionoidade		X	Carvalho (1994)
IR	Ipê-Roxo-de-Bola	<i>Tabebuia impetiginosa</i>	Bignoniaceae		X	Carvalho (1994)
PA	Paineira Rosa	<i>Chorisia speciosa</i>	Malvaceae		X	Durigan et al. (2002)
CB	Cabreúva	<i>Myroxylon peruiferum</i>	Papilionoideae		X	Durigan et al. (2002)
JT	Jatobá	<i>Hymenaea courbaril</i>	Caesalpinioideae		X	Carvalho (1994)
JE	Jequitibá-Branco	<i>Cariniana estrellensis</i>	Lecythidaceae		X	Carvalho (1994)

Para o fator Espaçamento, os dois níveis foram:

**3x1** - Espaçamento de 3 metros entre as linhas de preparo (subsolagem), e 1 metro entre as plantas, na linha, totalizando 3.333 plantas ha<sup>-1</sup>, ou 420 plantas na parcela total, e 264 plantas na parcela útil (12 linhas por 22 plantas) (Figura 2); e

**3x2** - Espaçamento de 3 metros entre as linhas de preparo (subsolagem), e 2 metros entre as plantas, na linha, totalizando 1.667 plantas ha<sup>-1</sup>, ou 210 plantas na parcela total, e 132 plantas na parcela útil (12 linhas por 11 plantas) (Figura 2).

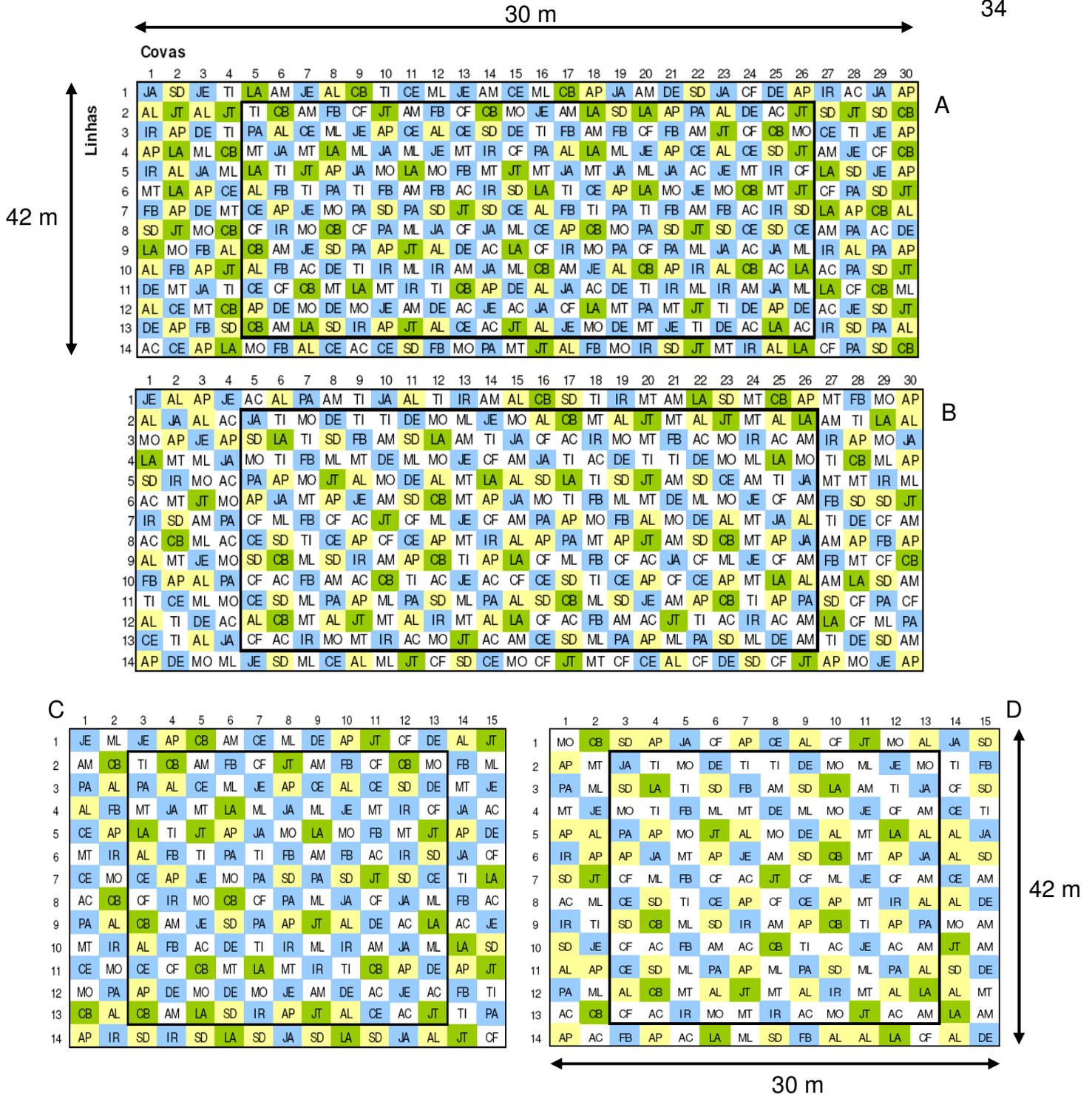


Figura 2 – Croquis das parcelas experimentais e a localização espacial das espécies. O retângulo central evidencia a parcela útil. As cores representam a classe sucessionial de cada indivíduo: amarelas – pioneiras; brancas – secundárias iniciais; azuis – secundárias tardias; verdes – climáticas. A parcela A representa o tratamento 50:50-3x1; B o tratamento 67:33-3x1; C o tratamento 50:50-3x2 e D o tratamento 67:33-3x2. Todas as parcelas têm o mesmo tamanho, e as siglas das espécies casualizadas dentro das parcelas estão na Tabela 2.

Para o fator Manejo, os níveis utilizados foram:

**Usu** – Manejo dito Usual, com abertura de covas nas linhas subsoladas (linhas de plantio). Adubação de base com 200 Kg ha<sup>-1</sup> de super fosfato triplo (pós-plantio) em duas covetas laterais, e 150 Kg ha<sup>-1</sup> de NPK 18:8:18 aos seis meses pós-plantio em semi-coroa. Controle de matocompetição (re-infestação de *Brachiaria decumbens*) por meio de capina manual na linha de plantio, numa faixa de 1 m (50 cm de cada lado da linha), e roçada mecânica na entrelinha até os 24 meses de idade do plantio. Após os 24 meses, não foi realizado mais o controle da matocompetição, tanto na linha quanto na entrelinha. O total de fertilizante aplicado foi: 12 kg N ha<sup>-1</sup>, 1,2 kg P ha<sup>-1</sup>, 5 kg K ha<sup>-1</sup>;

**Max** – Manejo dito Máximo, com abertura de covas nas linhas subsoladas. Adubação de base com 200 Kg ha<sup>-1</sup> de super fosfato simples, pós plantio, em duas covetas laterais, 2.000 Kg ha<sup>-1</sup> de calcário dolomítico a lanço 24 meses pós-plantio e 150 Kg ha<sup>-1</sup> de NPK 18:8:18 (semi-coroa) em maio e outubro de 2005 e outubro de 2006. O controle químico (glifosate, 5 L ha<sup>-1</sup>) de matocompetição foi realizado em área total três vezes ao ano, estando portanto, sempre livre de matocompetição. O total de fertilizante aplicado até os 24 meses foi igual ao usual, mas aos 36 meses o total já era de: 36 kgN ha<sup>-1</sup>, 3,6 kg P ha<sup>-1</sup>, 15 kg K ha<sup>-1</sup>, 1,2 kg Ca ha<sup>-1</sup>, 0,6 kg Mg ha<sup>-1</sup>;

Assim, os 3 fatores e seus níveis, estão listados na Tabela 3, a qual também contém os mnemônicos para os níveis dos fatores Composição (A e B), Espaçamento (1 e 2) e Manejo (U e X). Assim, os 8 tratamentos podem ser referidos como: A1U, A1X, A2U, A2X, B1U, B1X, B2U e B2X.

Tabela 3 – Fatores de estudo, níveis por fator, seus mnemônicos, e suas descrições.

Fatores	Nível	Mnemônico	Descrição dos Níveis
Composição	50:50	A	50% de espécies pioneiras e 50% não pioneiras
	67:33	B	67% de espécies pioneiras e 33% não pioneiras
Espaçamento	3x1	1	Espaçamento de plantio de 3m x 1m
	3x2	2	Espaçamento de plantio de 3m x 2m
Manejo	Usu	U	Práticas usuais em plantios de restauração
	Max	X	Tecnologia silvicultural máxima de restauração

### **3.3 Balanço Hídrico**

Estimou-se o balanço hídrico, para o período do estudo, pelo método de Thornthwaite e Mather (1955), com base em Rolim, Sentelhas e Barbieri (1998), visando avaliar a influência disponibilidade de água na dinâmica do crescimento florestal. Foram utilizados dados da estação meteorológica da EECF de Anhembi e da ESALQ/USP.

O valor da capacidade de água disponível no solo da área experimental foi considerado de 100mm, até 2m de profundidade, com base nos dados da Reunião de Classificação, Correlação de Solos e interpretação de Aptidão Agrícola (1988).

### **3.4 Medições dendrométricas**

Medições de altura total e diâmetro de fuste, na base ou a 30cm, foram realizadas anualmente, até os dois anos (Fevereiro de 2004 a Fevereiro de 2006), e semestralmente a partir dos dois anos de idade do experimento (Fevereiro de 2006 a Junho de 2007).

Para a medição de altura total foi utilizada uma régua graduada de 4m (precisão 10cm), com uma extensão de 3m. Convencionou-se como altura total a maior altura dos fustes das árvores, no caso de mais de um fuste. Para a medição de diâmetro de fuste foi utilizado paquímetro (precisão 1mm), para indivíduos menores que 5cm de diâmetro e suta (precisão 5mm), para indivíduos maiores de 5cm de diâmetro. Os valores foram coletados sempre com o instrumento posicionado paralelamente a linha de plantio. Foram realizadas medições de diâmetro, no colo das mudas até os dois anos de idade, e a 30cm do solo a partir do dois anos.

Devido à diversidade florística utilizada no experimento e o comportamento diferenciado das espécies, foram estabelecidos protocolos de medição de diâmetro e altura total. Todos os indivíduos dentro das parcelas úteis (Figura 2) eram medidos, para indivíduos com mais de um fuste media-se apenas os fustes acima de 2cm de diâmetro, caso todos os fustes fossem menores que 2cm então, media-se apenas o fuste com a maior altura total.

### 3.5 Biomassa e produtividade primária líquida de madeira

A produtividade primária líquida de madeira (PPLM) foi determinada pelos acréscimos anuais ou semestrais do estoque de biomassa do fuste. Dados dendrométricos (altura total e diâmetro do fuste) aplicados à equação do volume sólido (eq. (2)) permitiram obter o volume de cada indivíduo.

$$V = \left( \frac{\pi \cdot D^2}{4} \right) \cdot H \cdot ff \quad (2)$$

Onde:

- V: volume estimado do fuste da árvore (m<sup>3</sup>);
- D: diâmetro do fuste a 30 cm do solo (m);
- H: altura do fuste medido (m);
- ff: fator de forma específico da espécie (adimensional).

Para a determinação dos fatores de forma foram selecionadas 10 árvores de cada espécie, com diâmetro médio dentro da população, totalizando 200 indivíduos, sem distinção entre os tratamentos.

Depois de selecionadas em campo, foram medidos o diâmetro a 30cm do solo e altura total. Com estes dados foi calculado o volume cilíndrico de cada árvore (eq. (3))

$$V_c = \left( \frac{\pi \cdot D^2}{4} \right) \cdot H \quad (3)$$

Onde:

- V<sub>c</sub>: volume cilíndrico do fuste (m<sup>3</sup>);
- D: diâmetro do fuste (m);
- H: altura do fuste medido (m).

Posteriormente, nas mesmas 200 árvores, calculou-se o volume pelo método de Smalian, com final cônico (SCOLFORO, 1998), adaptado à situação encontrada no

experimento, devido à grande amplitude de alturas. Para utilizar este método, as árvores tiveram sua altura total dividida por 5, e os diâmetros foram medidos nestas 5 frações do fuste. A eq. (4) apresenta a equação de Smalian com final cônico.

$$V_s = c \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \left[ \left( \frac{D_1^2 + D_4^2}{2} \right) + D_2^2 + D_3^2 \right] + \frac{\left( \frac{\pi \cdot D_5^2}{4} \cdot m \right)}{3} \quad (4)$$

Onde:

- V<sub>s</sub>: volume pelo método de Smalian (m<sup>3</sup>);
- c: comprimento da seção (m);
- m: comprimento do ponteiro (m);
- D<sub>i</sub>: diâmetro da i-ésima fração do fuste (m);
- i: frações medidas do fuste (1 a 5).

A razão entre o valor obtido pela equação de Smalian e o valor obtido pela equação do volume cilíndrico resultou em um fator de forma específico a cada uma das 20 espécies presentes no experimento (eq.(5)).

$$ff = \frac{V_s}{V_c} \quad (5)$$

Onde:

- ff: fator de forma (adimensional);
- V<sub>s</sub>: volume pelo método de Smalian (m<sup>3</sup>);
- V<sub>c</sub>: volume cilíndrico do fuste (m<sup>3</sup>).

Uma vez obtido o volume de cada indivíduo, sua biomassa foi determinada pela multiplicação pela densidade básica da madeira (eq.(6)). Para a determinação da densidade básica da madeira por espécie, foram coletadas amostras de indivíduos com diâmetro médio dentro da população de sua espécie, sem distinção entre os

tratamentos. Nas parcelas destrutivas coletaram-se 12 amostras por espécie (3 por bloco, nos 4 blocos) das 20 espécies utilizadas, totalizando 240 amostras.

Em laboratório seguiu-se o método da balança hidrostática (FOELKEL et al., 1971). As amostras foram colocadas em tanques de saturação em água até imersão completa, em seguida mediu-se o peso saturado e também o peso submerso. Posteriormente foram secas em estufa de ventilação forçada a  $105^{\circ}\text{C} \pm 3$  até massa constante quando foi medido o peso totalmente seco. Estes valores foram aplicados a eq. (6) para a determinação da densidade básica de cada espécie.

$$Db = \frac{Ps}{(Psat - Psub)} \cdot \rho \quad (6)$$

Onde:

Db: densidade básica da madeira ( $\text{g cm}^{-3}$ );

Ps: peso seco (g);

Psat: peso saturado (g);

Psub: peso saturado submerso em água (g);

$\rho$ : densidade da água ( $\text{g cm}^{-3}$ ).

Tendo-se então a biomassa de cada indivíduo, pela multiplicação de seu volume e densidade, obteve-se o estoque de biomassa para cada parcela através da soma de biomassa de todos seus indivíduos da parcela útil, e a expansão para o hectare dividindo-se pela área útil da parcela ( $\text{m}^2$ ) e multiplicando-se por 10.000 (B, em Mg/ha).

Assim, a produtividade primária líquida da madeira (PPLM) de um período foi calculada pela subtração das biomassas existentes no final e no início do período (eq. (7)).

$$PPLM_{ij} = (B_{ij} - B_{i(j-1)}) / (j - 1) \quad (7)$$

Onde:

PPLM: produtividade primária líquida de madeira ( $\text{Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  ou  $\text{Mg ha}^{-1} \text{ semestre}^{-1}$ );

B: biomassa de madeira ( $\text{Mg ha}^{-1}$ );

i: parcela;

j: tempo (semestre ou ano).

### 3.6 Índice de área de vegetação e foliar

O índice de área de vegetação (IAV) de cada parcela foi determinado por meio de fotografias hemisféricas digitais tiradas do dossel, e utilizando o programa *Hemisfer* 1.41. O índice de área foliar (IAF) foi então obtido com base numa equação de calibração entre o IAV e o IAF. As avaliações de IAV e IAF foram realizadas em duas épocas do ano, verão (janeiro) e inverno (julho), visando observar a variação sazonal, devido às características de caducifolia de algumas das espécies.

#### 3.6.1 Método indireto de determinação de índice de área de vegetação

Para a determinação do IAV, foram tiradas 6 fotografias hemisféricas (3 *megapixels*) do dossel de cada uma das 32 parcelas, distribuídas sistematicamente nas parcelas úteis (Figura 3). Tomaram-se 192 fotos em cada época do ano. As fotos foram tiradas entre 7:00-10:30 e 15:30-18:00 horas, evitando a incidência direta de raios solares na lente, em Janeiro e Junho de 2007.



cada anel (X: 10 anéis e 8,5 graus e Y: 5 anéis e 17 graus); 2 valores de raio de abrangência da imagem a ser analisada (1: 400 pixels e 2: 440 pixels) e com ou sem correções para declividade do terreno e sobreposição de folhas (R: com correções e N: sem correções).

Os valores estimados foram então submetidos a quatro tipos de correção, referentes à topografia da área e sobreposição dos elementos do dossel (CHEN; CHILAR, 1986; LANG; XIANG, 1986; WALTER; TORQUEBIAU, 2000; SCHLEPPI et al., 2007). A parametrização do programa utilizada para a análise das fotos está apresentada na Tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros iniciais requeridos pelo programa Hemisfer 1.41, unidades, valores e métodos utilizados para o presente estudo.

<b>Eixo X (pixels)</b>	630
<b>Eixo Y (pixels)</b>	520
<b>Raio (pixels)</b>	400 ou 440
<b>Norte (°)</b>	0
<b>Declinação (°)</b>	19
<b>Anéis</b>	10 ou 5
<b>Graus (°)</b>	8,5 ou 17
<b>Declividade (°)</b>	0
<b>Aspecto</b>	0
<b>Threshold</b>	Nobis e Hunziker (2005)
<b>Cores</b>	vermelho, verde e azul (sRGB)
<b>Gama (<math>\gamma</math>)</b>	2,2
<b>Lente</b>	Linear

Foram considerados como *outliers*, e excluídos das análises, apenas 4 valores de IAV que apresentaram problemas na interpretação das fotos hemisféricas (ex.: componentes do dossel posicionados a 50cm ou menos da lente, e incidência direta de raio solar), evitando interpretações equivocadas do IAV.

### 3.6.2 Método direto destrutivo de determinação de índice de área foliar

O método direto destrutivo foi realizado para calibrar o método indireto (fotografias hemisféricas), pois quando se utiliza fotos para obter o IAF, outros

componentes do dossel, que não folhas (galhos, frutos, flores), também contribuem, resultando em valores superestimados (BRÉDA, 2003; JONCKHEERE et al., 2004).

Com base em fotografias hemisféricas iniciais, foram selecionadas 8 parcelas representativas de toda a amplitude de IAV presente no experimento. Nestas parcelas foram realizadas as análises destrutivas, em janeiro de 2007 (experimento com 36 meses de idade). Inicialmente foram selecionadas as posições para coleta de folhas em quatro pontos nas linhas de borda das 8 parcelas, totalizando 32 pontos (Figura 4).

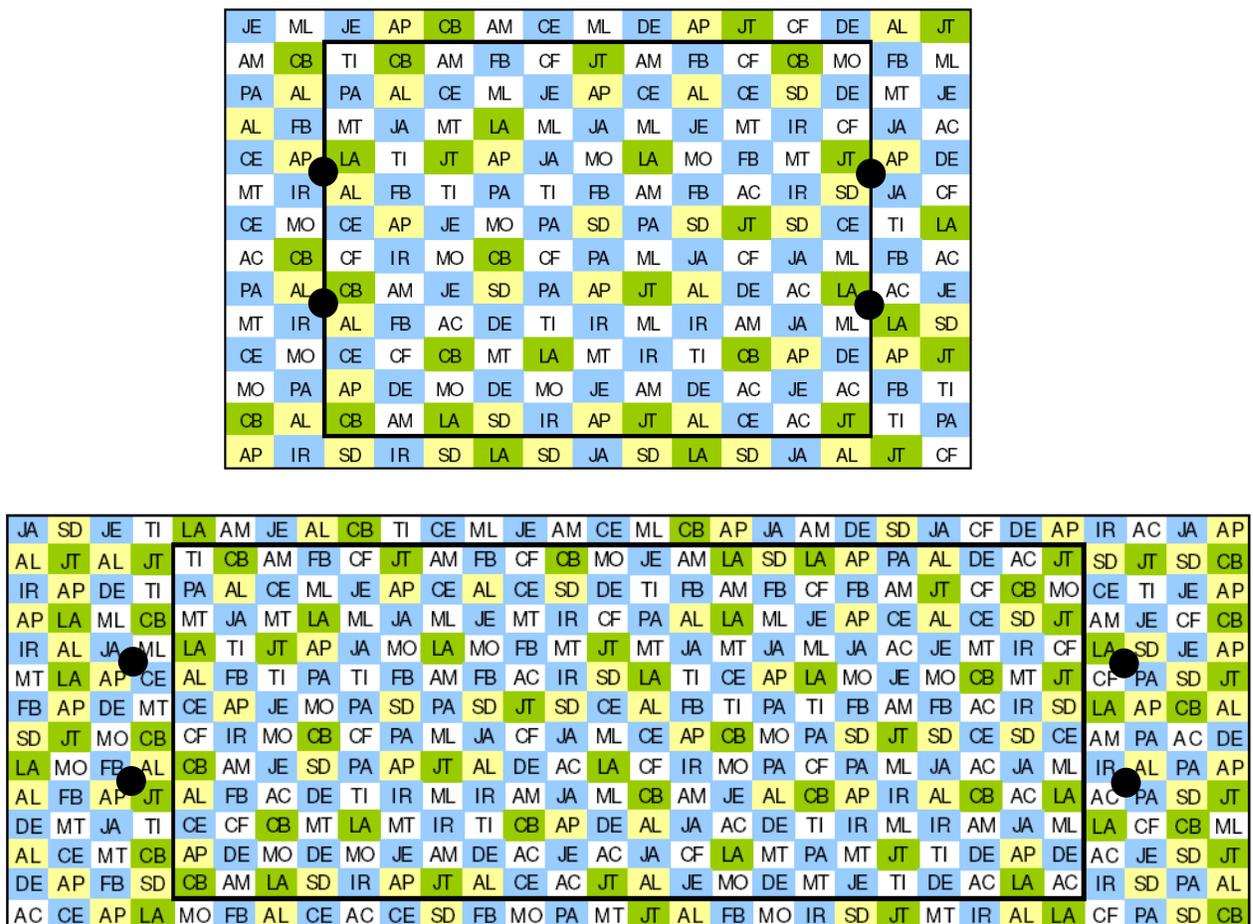


Figura 4 – Distribuição das posições onde foram tiradas as fotos para a seleção dos pontos das análises destrutivas. Os círculos pretos indicam as posições em parcelas 50:50-3x2 e 50:50-3x1, respectivamente. As mesmas posições foram utilizadas em parcelas 67:33-3x2 e 67:33-3x1.

Anteriormente à coleta das folhas foram tiradas fotos nas posições selecionadas. Para a coleta, uma moldura de madeira de área interna 2,25 m<sup>2</sup> (1,5 x 1,5 m) foi posicionada no solo, nas exatas localizações onde foram tiradas as fotos. Todas as

folhas, do solo ao fim do dossel (altura total do ponto), que estavam compreendidas na área interna à moldura foram coletadas com um podão de cabo telescópico, permitindo total acesso às copas das árvores (Figura 5). As folhas coletadas, separadas em nível de ponto, foram medidas no integrador de área foliar LI-3100C (LI-COR, Lincoln, NE, EUA). O  $IAF_{real}$  de cada ponto foi a soma das áreas de todas as folhas presentes em determinada amostra, dividida pela área da moldura ( $m^2$  folha  $m^{-2}$  solo).



Figura 5 – Representação esquemática do método destrutivo de coleta das folhas para a determinação do  $IAF_{real}$ . **A** representa uma visão interna da floresta e da área amostral imaginária criada acima da moldura 1,5x1,5m, e **B** uma visão do dossel com a área amostral de 2,25m<sup>2</sup> já coletada.

### 3.6.3 Calibração do índice de área foliar

Os valores de IAV estimados indiretamente foram confrontados com os valores de  $IAF_{real}$  medidos diretamente de forma destrutiva. Posteriormente, com programa SAS 9.1 (Statistical Analysis System, SAS Institute Inc., Cary, NC, EUA) foi gerada a regressão de calibração (procedimento *REG*, *stepwise*), com o objetivo de: 1) obter o

IAF com base no IAV calculado pelas fotos hemisféricas, 2) identificar qual dos cinco métodos de determinação de IAV utilizados pelo programa *Hemisfer* 1.41 apresentou o maior coeficiente de determinação ( $r^2$ ).

### 3.7 Fator de extinção de luz

Foram determinados fatores de extinção de luz específicos para as condições experimentais, com a finalidade de utilizá-los nos cálculos da radiação fotossinteticamente ativa incidente que foi interceptada pelo dossel de cada parcela.

Para a medição de radiação fotossinteticamente ativa (RFA, comprimento de onda de 400 a 700nm), incidente e transmitida pelo dossel florestal das parcelas, foi utilizado o ceptômetro (modelo PAR-80, Decagon Devices Inc., Pullman, WA, EUA), que possui 80 sensores eqüidistantes (fotodiodos) dispostos em uma sonda de 1m de comprimento, e apresenta valores de RFA em tempo real.

As medições de RFA incidente foram realizadas em janeiro de 2007 (experimento com 36 meses de idade), em área aberta, livre de qualquer impedimento ou interferência entre a radiação solar incidente e a sonda do aparelho, a uma distância de no mínimo sete vezes a altura da vegetação mais próxima (BRÉDA, 2003). As medições de RFA transmitida foram realizadas nos mesmos pontos em que foram tiradas as fotografias hemisféricas para determinação do IAV (método indireto, item 3.6.1).

Todas as medidas (RFA incidente e transmitida) foram tomadas entre 11:00 e 14:00 horas, niveladas com nível de bolha e voltadas para os quatro pontos cardeais principais (norte, leste, sul e oeste), resultando em 4 medidas a cada ponto. Todas as medições de RFA transmitida tiveram sua correspondente em RFA incidente, onde o intervalo de tempo entre ambas foi sempre inferior a 2 minutos.

Com os valores de RFA (incidente e transmitida) e de IAF (IAV corrigido pela regressão de calibração), de todos os tratamentos, foi possível calcular o fator de extinção de luz pela inversão da equação de Lambert-Beer (eq. (8)).

$$k = -\left(\frac{1}{IAF}\right) \cdot \ln\left(\frac{I}{I_0}\right) \quad (8)$$

Onde:

k: fator de extinção de luz;

IAF: índice de área de foliar com base no IAV corrigido pela equação de calibração ( $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$ );

$I_0$ : radiação fotossinteticamente ativa incidente ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ );

I: radiação fotossinteticamente ativa transmitida ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ).

### 3.8 Radiação fotossinteticamente ativa interceptada

Como a E.E.C.F de Anhembi não possui um aparelho específico para a medição da RFA incidente (posto meteorológico simples), foi ajustada uma regressão linear (procedimento REG / *Stepwise*, SAS Institute Inc. Cary, NC, EUA) para estimar tais valores, a partir de dados do posto meteorológico da ESALQ/USP (Piracicaba, 22°42' Sul, 47°38' Oeste, altitude 548 m), localizado a aproximadamente 50 km lineares de Anhembi. A regressão foi gerada utilizando dados climáticos do período de janeiro de 2004 (implantação do experimento) a junho de 2007.

A regressão resultante mostrou que os dados de radiação global incidente em Piracicaba foram altamente correlacionados com a temperatura máxima média mensal (eq.(9),  $r^2=0,74$ ,  $P<0,0001$ ). Além disso, houve grande semelhança entre a temperatura máxima média mensal da área experimental e de Piracicaba (Correlação de Pearson=0,75;  $P<0,0001$ ).

Assim, os valores de temperatura máxima média mensal da E.E.C.F. Anhembi foram aplicados na eq.(9), obtendo-se as estimativas das radiações globais incidentes durante o período.

$$RG = -17,3504 + 1,2186 \cdot T \text{ max} \quad (9)$$

Onde:

RG: radiação global média mensal ( $\text{TJ ha}^{-1} \text{mês}^{-1}$ );

Tmax: temperatura máxima média mensal ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Para a conversão de radiação global incidente em RFA incidente foi determinado um fator com dados diários dos anos de 1997 e 1998 (anos com as duas variáveis disponíveis no banco de dados do posto meteorológico da ESALQ/USP, Piracicaba). Tal fator foi calculado por meio da razão entre os tipos de radiação (RFA/RG), resultando no valor de  $0,498 \pm 0,041$ , consistente com dados de literatura (LARCHER, 1995; LANDSBERG; GOWER, 1997).

Com os valores de RFA incidente (estimados para a E.E.C.F. de Anhembi), IAF (item 3.6) e fator de extinção de luz (item 3.7) foi possível calcular a radiação fotossinteticamente ativa interceptada (RFAI) pelo dossel florestal para cada parcela (eq. (10)). A RFAI foi calculada para o período de janeiro a junho de 2007 (36 para 42 meses de idade do experimento).

$$RFAI = \sum_{i=1}^6 \left[ RFA_i \cdot \left( 1 - e^{-k \cdot IAF_i} \right) \right] \quad (10)$$

Onde:

RFAI: radiação fotossinteticamente ativa interceptada ( $TJ \text{ ha}^{-1} \text{ semestre}^{-1}$ );

RFA: radiação fotossinteticamente ativa ( $TJ \text{ ha}^{-1} \text{ mês}^{-1}$ );

k: fator de extinção de luz;

IAF: índice de área de foliar estimado ( $\text{m}^2 \text{ m}^{-2}$ );

i: meses (1 a 6).

### 3.9 Eficiência do uso da luz

Com a produtividade primária líquida da madeira (PPLM, item 3.5) e a radiação fotossinteticamente ativa interceptada (RFAI, item 3.8) calculou-se a eficiência do uso da luz (EUL) para cada parcela, para o período de janeiro a junho de 2007 (42 meses de idade do experimento), como na eq. (11).

$$\varepsilon = \frac{PPLM}{RFAI} \quad (11)$$

Onde:

$\varepsilon$  ou EUL: eficiência do uso da luz ( $\text{Mg TJ}^{-1}$ );

PPLM: produtividade primária líquida de madeira ( $\text{Mg ha}^{-1} \text{ semestre}^{-1}$ );

RFAI: radiação fotossinteticamente ativa interceptada ( $\text{TJ ha}^{-1} \text{ semestre}^{-1}$ ).

### 3.10 Avaliação nutricional do dossel

Foi realizada a determinação do elemento nitrogênio na biomassa foliar como forma de avaliar o estado nutricional do dossel de cada parcela, para auxiliar na interpretação dos resultados de eficiência do uso da luz.

Sub-amostras das folhas coletadas para a a determinação do IAF (item 3.6.2) foram secas em estufa a  $40^\circ\text{C} \pm 3$  até peso constante, moídas em moinho fino tipo Willey, encaminhadas ao Laboratório de Ecologia Aplicada do Departamento de Ciências Florestais da ESALQ/USP, e sendo feita a determinação do nitrogênio por meio da digestão úmida/sulfúrica, pelo método de Kjeldahl (MALAVOLTA et al., 1989).

Os teores de nitrogênio na massa foliar, o IAF de cada tratamento e a área foliar específica (área da folha por massa de folha,  $\text{kg m}^{-2}$ ), permitiram estimar a quantidade de nitrogênio no dossel de cada parcela (eq. (12)). Foi utilizada a AFE média das espécies presentes em cada sub-amostra, com base nos valores obtidos por IANNELLI-SERVIN (2007), na mesma área experimental.

$$N_{\text{dossel}} = \frac{[N] \cdot IAF}{AFE} \quad (12)$$

Onde:

$N_{\text{dossel}}$ : conteúdo de nitrogênio no dossel (g de nitrogênio  $\text{m}^{-2}$  solo);

[N]: concentração de nitrogênio na massa foliar (g de N  $\text{kg}^{-1}$  folhas);

IAF: índice de área foliar real ( $\text{m}^2$  folha  $\text{m}^{-2}$  solo);

AFE: área foliar específica (3,2 a 18,5  $\text{m}^2$  folha  $\text{kg}^{-1}$  folhas).

Para ampliar a capacidade de análise dos valores de EUL, foi calculado um índice que integra a concentração do elemento nitrogênio presente no dossel e a RFAI por suas folhas, conforme proposto por Green et al. (2003) (eq. 13).

$$i_N = \frac{N_{dossel} \cdot AFE}{\left( \frac{RFAI}{RFA} \right)} \quad (13)$$

Onde:

$i_N$ : índice de relação nutrição e uso da luz;

$N_{dossel}$ : conteúdo de nitrogênio no dossel (g de N m<sup>-2</sup> solo);

AFE: área foliar específica (m<sup>2</sup> folha kg<sup>-1</sup> folha);

RFAI: radiação fotossinteticamente ativa interceptada (TJ ha<sup>-1</sup>semestre<sup>-1</sup>);

RFA: radiação fotossinteticamente ativa (TJ ha<sup>-1</sup>semestre<sup>-1</sup>).

Este índice quantifica a dependência entre utilização da radiação e a quantidade de nitrogênio presente no aparato fotossintético (enzimas, pigmentos e componentes de transporte de elétrons), proporcionando uma integração abrangente entre fatores biofísicos e bioquímicos que resultam nos valores de EUL.

### 3.11 Análises estatísticas

Foram realizadas análises de variância (ANOVA), por fator e suas interações, para as variáveis PPLM anual e semestral, IAF, RFAI, EUL e conteúdo de nitrogênio no dossel. No caso de efeitos significativos, testes de comparação de médias pelo método de Tukey (*Tukey's studentized range test, HSD*) com nível de significância de 0,05 (controle de erro tipo 1) foram utilizados.

Todas as análises foram realizadas com o pacote estatístico SAS 9.1 (Statistical Analysis System, SAS Institute Inc., Cary, NC, EUA).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Clima

Os valores de temperatura média mensal e precipitação mensal, registrados durante todo o período do experimento (março de 2004 a junho de 2007), foram obtidos na estação meteorológica da Estação Experimental de Anhembi e estão apresentados na Figura 6.

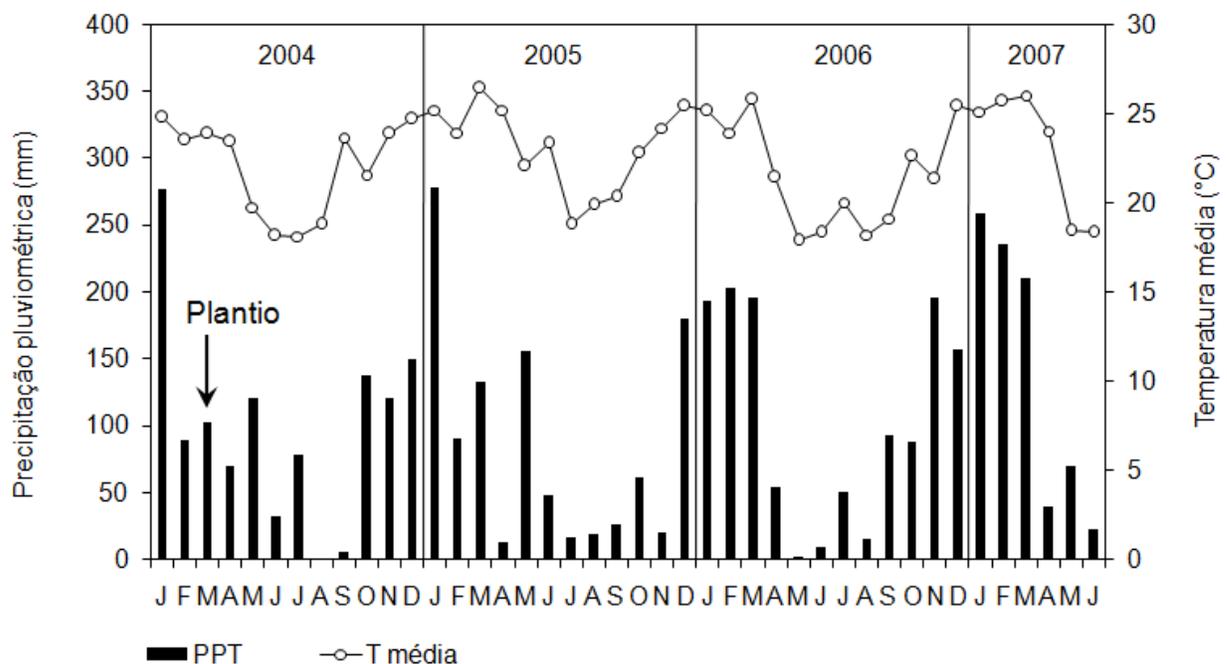


Figura 6 – Precipitação pluviométrica mensal (PPT) e temperatura média mensal (T média) da EECF da Esalq/USP em Anhembi-SP, de janeiro de 2004 a junho de 2007. Plantio em Março de 2004.

Os dados climáticos mostram que para os anos de 2004, 2005 e 2006, a precipitação anual média foi de 1158mm, com nítida distribuição em um período chuvoso (outubro a março) e outro seco (abril a setembro). Da precipitação anual total, aproximadamente 74%, 73% e 82% concentraram-se nos períodos chuvosos dos anos de 2004, 2005 e 2006 respectivamente.

Ao longo de todo o período, a temperatura média dos meses mais quentes foi de aproximadamente de 26,0 °C no verão e 18 °C nos meses de inverno. Não foi registrada ocorrência de geadas que pudessem comprometer as plantas.

Foi realizado o cálculo do balanço hídrico normal pelo método de Thornthwaite e Mather (1955) com base em Rolim et al. (1998), considerando uma capacidade de água disponível no solo de 100 mm para 2 metros de perfil de solo, face à sua característica arenosa. Os resultados estão na Figura 7.

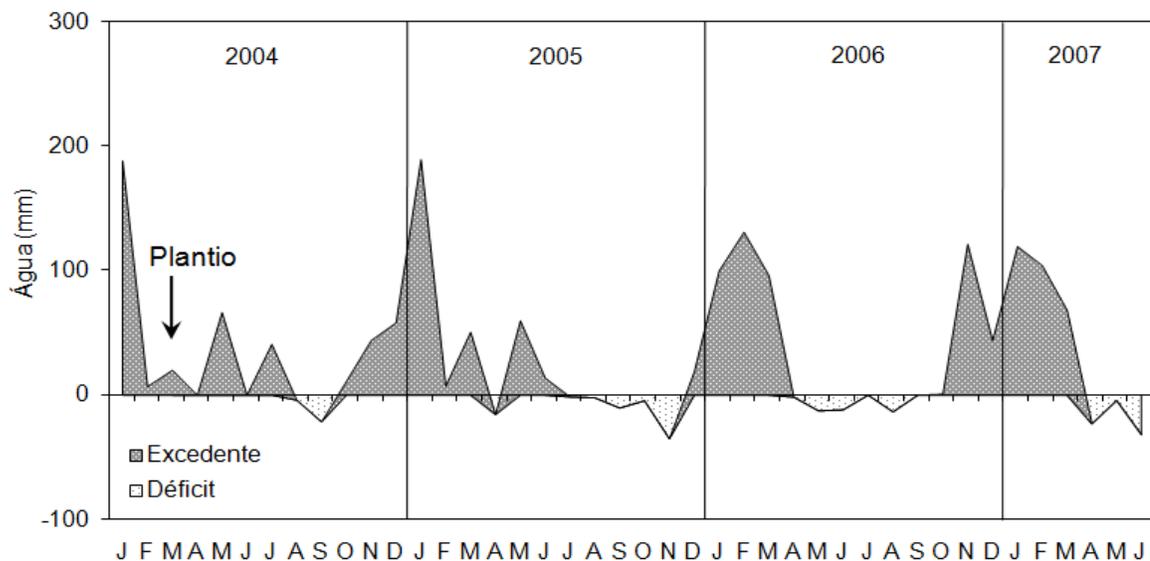


Figura 7 – Balanço hídrico pelo método de Thornthwaite & Mather (1955) para o período de janeiro de 2004 a junho de 2007, considerando a capacidade de água disponível no solo de 100 mm.

No ano de 2004 o déficit hídrico acumulado foi de 26 mm, somente durante os meses de agosto e setembro, e em 2005 foi mais duradouro (de julho a novembro) e intenso (69 mm). Em 2006 o déficit hídrico iniciou-se em abril, perdurando até agosto (39 mm), e em 2007, até o mês de junho o déficit acumulado era de 59 mm. Estes valores, apesar de não serem excessivos, caracterizam a ocorrência de déficit hídrico, típico de áreas de Mata Atlântica Estacional Semidecidual, explicando o grande número de espécies com características caducifólias (ASSUNÇÃO et al., 1982; CESAR, 1988).

A radiação fotossinteticamente ativa (RFA) incidente na área experimental de Anhembi, durante o período de janeiro de 2004 a junho de 2007, e que foram estimadas a partir da correlação com a temperatura máxima mensal, utilizando dados da estação meteorológica de Piracicaba da ESALQ/USP (50 km lineares de distância), estão apresentadas na Figura 8.

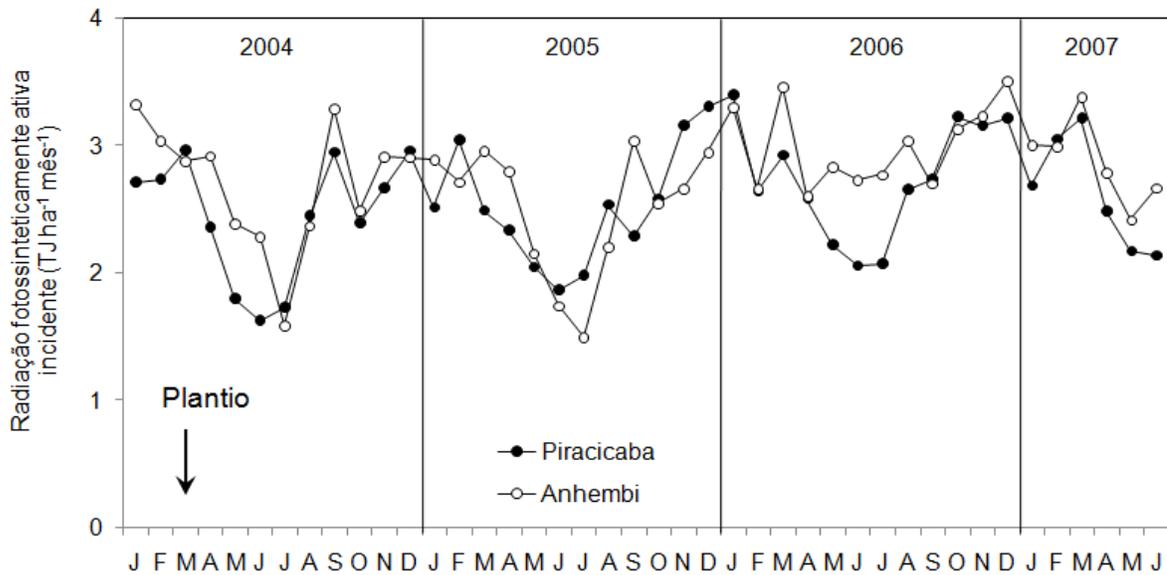


Figura 8 – Radiação fotossinteticamente ativa mensal (RFA) estimada para a Estação Experimental de Anhembi, e a observada no posto meteorológico da ESALQ/USP em Piracicaba, entre janeiro de 2004 a junho de 2007.

Durante o período avaliado, os valores de RFA na área experimental de Anhembi variaram de  $1,5 \text{ TJ ha}^{-1} \text{ mês}^{-1}$  em julho de 2005 a  $3,5 \text{ TJ ha}^{-1} \text{ mês}^{-1}$  em dezembro de 2006, sendo que os maiores valores são observados nos períodos de verão e os menores nos períodos de inverno, devido a sua localização de  $22^{\circ}$  de latitude sul.

No verão, quando ocorrem altos valores de RFA e elevados índices pluviométricos, é quando as florestas tendem a apresentar seu maior índice de área foliar, maximizando a captura de  $\text{CO}_2$  da atmosfera, dada a ampla disponibilidade de ambos os recursos, radiação solar e água. Já no inverno, com a ocorrência de déficits hídricos, e caducifolia total ou parcial, é esperada a queda da produtividade. Portanto, a restauração florestal deve visar a potencialização do crescimento das espécies arbóreas durante todo o ano, mas notadamente no verão, e para isto é necessário controlar a competição com as gramíneas invasoras, que por terem metabolismo  $\text{C}_4$ , são altamente competitivas por recursos hídricos e nutricionais (LAMB; TOMLINSON, 1994; LARCHER, 2006).

## 4.2 Crescimento de biomassa de madeira

A densidade básica da madeira e o fator de forma de cada uma das 20 espécies do ensaio, determinados aos 36 e 42 meses de idade, respectivamente, estão apresentados na Tabela 5. Ambas as informações são necessárias para a correta estimativa da produção de biomassa nas parcelas do ensaio, com multiplicidade de espécies.

Tabela 5 – Nome popular, densidade básica da madeira e desvio padrão da média ( $n=12$ ), fator de forma e desvio padrão da média ( $n=10$ ), determinados aos 36 e 42 meses, respectivamente, para as 20 espécies nativas do ensaio. As espécies estão ordenadas pela densidade crescente.

Nome popular	Densidade básica g cm <sup>-3</sup>	Fator de forma
Paineira	0,20 ± 0,01	0,40 ± 0,12
Timburi	0,24 ± 0,04	0,52 ± 0,09
Mulungu	0,27 ± 0,02	0,44 ± 0,06
Algodoeiro	0,29 ± 0,03	0,43 ± 0,08
Cedro Rosa	0,31 ± 0,05	0,60 ± 0,11
Sangra D'água	0,34 ± 0,03	0,49 ± 0,12
Figueira Branca	0,34 ± 0,08	0,58 ± 0,14
Açoita Cavalo	0,36 ± 0,01	0,49 ± 0,08
Jacarandá	0,36 ± 0,02	0,56 ± 0,10
Jequitibá	0,39 ± 0,04	0,52 ± 0,20
Mutambo	0,41 ± 0,04	0,46 ± 0,13
Ipê Roxo de Bola	0,42 ± 0,03	0,46 ± 0,07
Aroeira Pimenteira	0,44 ± 0,02	0,52 ± 0,15
Canafístula	0,45 ± 0,04	0,54 ± 0,13
Cabreúva	0,48 ± 0,04	0,61 ± 0,25
Jatobá	0,50 ± 0,02	0,44 ± 0,08
Dedaleiro	0,51 ± 0,03	0,54 ± 0,12
Amendoim Bravo	0,54 ± 0,04	0,62 ± 0,16
Lapacho	0,62 ± 0,11	0,58 ± 0,13
Monjoleiro	0,65 ± 0,07	0,55 ± 0,14

Nota-se, pela Tabela 5, que há grande variabilidade de densidade básica da madeira entre as espécies nativas, com variação de até 325% (0,20 g/cm<sup>3</sup> para a Paineira *versus* 0,65 g cm<sup>-3</sup> para o Monjoleiro). Estes valores, para esta idade, estão em concordância com os valores de densidade básica relatados por Lorenzi (1992), Carvalho (1994) e Durigan et al. (2002), e apresentam uma média geral de 0,41±0,12 g cm<sup>-3</sup>, aos 3 anos.

Tal variabilidade evidencia a necessidade de se avaliar a densidade da madeira na estimativa de crescimento florestal, uma vez que se a densidade média fosse aplicada a todas as espécies, os valores de biomassa por hectare seriam superestimados em até 14%. Além disso, do ponto de vista aplicado, para estimativas de captura de carbono em florestas tropicais, é fundamental o conhecimento da biomassa real, e tal erro não pode ser introduzido nos cálculos (MALHI; GRACE, 2000).

Por outro lado, o fator de forma, necessário para estimativa do volume sólido de cada indivíduo, teve menor variação, com valor médio de 0,52, próximo ao usual em literatura de 0,50 (IANNELLI-SERVIN, 2007). Os valores extremos foram de 0,40 para a paineira e 0,62 para o amendoim bravo (55% de variação), com uma superestimativa da biomassa de no máximo 4% no caso de utilização do valor médio. Assim, no caso de trabalhos de quantificação de biomassa, em havendo restrições logísticas, é preferível concentrar esforços na determinação da densidade da madeira, e utilizando um fator de forma médio, mas não o contrário.

De posse dos valores de densidade básica e fator de forma para cada espécie (Tabela 5), e com os valores de diâmetro e altura dos indivíduos medidos aos 12, 24, 30, 36 e 42 meses, elaborou-se a Tabela 6, que mostra o estoque de biomassa de madeira em cada um dos 8 tratamentos do fatorial  $2^3$  nestas idades.

Tabela 6 – Estoque de biomassa de madeira ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) entre 12 e 42 meses, para os 8 tratamentos, em ordem decrescente de biomassa aos 42 meses. Valores seguidos de mesma letra, por idade, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ( $P=0,05$ ).

Tratamentos	Biomassa de madeira ( $\text{Mg ha}^{-1}$ )				
	Idade (meses)				
	12	24	30	36	42
<b>67:33-3x2-Max</b>	1,0 ab	6,6 abc	10,0 ab	15,3 ab	20,6 a
<b>67:33-3x1-Max</b>	2,0 a	9,5 a	12,2 a	17,8 a	19,9 a
<b>50:50-3x2-Max</b>	1,4 ab	7,7 ab	10,9 a	17,1 a	18,0 ab
<b>50:50-3x1-Max</b>	0,7 ab	4,2 abcd	7,4 abc	12,0 abc	16,1 ab
<b>50:50-3x1-Usu</b>	1,2 ab	3,3 bcd	4,0 bc	6,7 bcd	8,7 bc
<b>67:33-3x1-Usu</b>	1,0 ab	3,0 bcd	3,1 c	4,4 cd	5,4 c
<b>67:33-3x2-Usu</b>	0,4 b	1,0 cd	1,0 c	1,9 d	2,5 c
<b>50:50-3x2-Usu</b>	0,3 b	0,8 d	0,9 c	1,6 d	2,0 c

Dos 3 fatores do estudo, Composição, Espaçamento e Manejo, é destacadamente o Manejo, em seu nível máximo, aquele que vem propiciando à floresta em restauração os maiores crescimentos, desde as idades iniciais, e consolidando-se aos 42 meses (Tabela 6). Observa-se que a partir do segundo ano, os tratamentos que receberam manejo máximo mostraram, estatisticamente, maiores valores de estoque de biomassa de madeira em relação ao manejo usual, com uma diferença de crescimento de mais de 900% ( $2,0 \text{ Mg ha}^{-1}$  versus  $20,6 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) entre os extremos. Assim, este elevado ganho de produção, *per si*, já evidencia que as espécies nativas têm alto potencial de crescimento, estando em grande parte limitadas em seu crescimento por estresses ambientais que as práticas de manejo podem aliviar ou eliminar (LAMB; TOMLINSON, 1998; IANNELLI-SERVIN, 2007).

Entre os 3 fatores, não houve basicamente interação significativa até o 3º ano (Tabela 7), evidenciando início de interações Composição x Manejo e Espaçamento x Manejo, aos 42 meses. Assim, a tabulação e análise serão inicialmente efetuadas por efeito principal, com posterior destaque para estas interações.

Tabela 7 – Valores de significância (*P*) pela análise de variância dos efeitos principais e das interações entre os fatores, para estoque de biomassa de madeira, nas diversas idades.

Causa da Variação	Idade (meses)				
	12	24	30	36	42
<b>Composição</b>	0,19	0,06	0,24	0,54	0,35
<b>Espaçamento</b>	<0,01*	<0,01*	<0,01*	<0,01*	<0,01*
<b>Manejo</b>	<0,01*	<0,01*	<0,01*	<0,01*	<0,01*
<b>Composição x Manejo</b>	0,12	0,05	0,09	0,09	0,03*
<b>Composição x Espaçamento</b>	0,93	0,58	0,38	0,14	0,11
<b>Espaçamento x Manejo</b>	0,57	0,34	0,84	0,84	0,05*
<b>Composição x Espaçamento x Manejo</b>	0,33	0,97	0,92	0,92	0,75

\* Significativo ( $P=0,05$ )

Na Tabela 8, pode-se observar os efeitos dos níveis dos fatores Composição, Espaçamento e Manejo no estoque de biomassa de madeira nas diversas idades.

Tabela 8 – Estoque de biomassa de madeira nas avaliações, por nível dos fatores. Valores seguidos da mesma letra, por idade e fator, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ( $P=0,05$ ).

Fator	Níveis	Biomassa de madeira ( $Mg\ ha^{-1}$ )				
		Idade (meses)				
		12	24	30	36	42
Composição	50:50	0,9 a	4,0 a	5,8 a	9,3 a	11,2 a
	67:33	1,1 a	5,0 a	6,6 a	9,9 a	12,1 a
Espaçamento	3x1	1,4 a	5,9 a	7,6 a	11,5 a	13,0 a
	3x2	0,6 b	3,1 b	4,8 b	7,7 b	10,3 b
Manejo	Max	1,3 a	7,0 a	10,2 a	15,6 a	18,6 a
	Usu	0,7 b	2,0 b	2,2 b	3,7 b	4,6 b

Analisando os valores da Tabela 8, ao longo de todo o período do experimento, observa-se que a composição 67:33, com maior proporção de espécies pioneiras, não diferiu estatisticamente da composição 50:50, como mostrado na Figura 9 (gráfico A). Apesar de Kageyama e Castro (1989) afirmarem que as espécies pioneiras possuem maiores taxas de crescimento que as não pioneiras, tal diferença não resultou em maior acúmulo de biomassa de madeira para a composição 67:33.

Este resultado tem elevada importância ao considerarmos a maior longevidade das espécies não-pioneiras e sua importância na biodiversidade. Assim, constata-se que a manutenção da razão de 50% de pioneiras e 50% de não-pioneiras, é preferível, comparativamente ao aumento das não-pioneiras, uma vez que este incremento não resultou em maior crescimento da floresta, mas afetou negativamente a frequência de não-pioneiras plantadas por hectare. De forma contrária, poderia-se agora pesquisar em sentido inverso, ou seja, até que ponto poderia-se reduzir a participação das não-pioneiras no processo de restauração, visando a maior diversidade de secundárias tardias e climáticas no longo prazo.

Para o fator espaçamento, o maior crescimento no plantio 3 m x 1m, em relação ao 3 m x 2m, passou de 133% ( $1,4\ Mg\ ha^{-1}$  versus  $0,6\ Mg\ ha^{-1}$ ) aos 12 meses, para apenas 26% aos 42 meses ( $13,0\ Mg\ ha^{-1}$  versus  $10,3\ Mg\ ha^{-1}$ ), como mostrado na Figura 9 (gráfico B). Estes resultados permitem antever que a igualdade de produção entre ambos os espaçamentos deverá ocorrer em breve período de tempo, de forma

que parece seguro afirmar que plantios de 3 m x 2 m já contém número suficiente de indivíduos para a rápida exploração do sítio, antes dos 4 anos. Estes resultados contradizem Henskens et al. (2001) que afirmam que em plantios com maior densidade populacional, o crescimento em biomassa é maior devido a maior interceptação da RFA. Outrossim, face a existência de interação Espaçamento x Manejo, o efeito da densidade no desenvolvimento deverá ser analisada mais cuidadosamente, como feito adiante.

Ao longo de todo o experimento, confirma-se que o manejo foi o fator que mais contribuiu para o aumento do estoque de madeira na floresta, com um ganho de 301% em relação ao manejo usual, aos 42 meses (18,6 Mg ha<sup>-1</sup> *versus* 4,6 Mg ha<sup>-1</sup>). Como pode ser constatado visualmente na Figura 9 (gráfico C), este efeito positivo do manejo máximo torna-se cada vez maior em relação ao manejo usual.

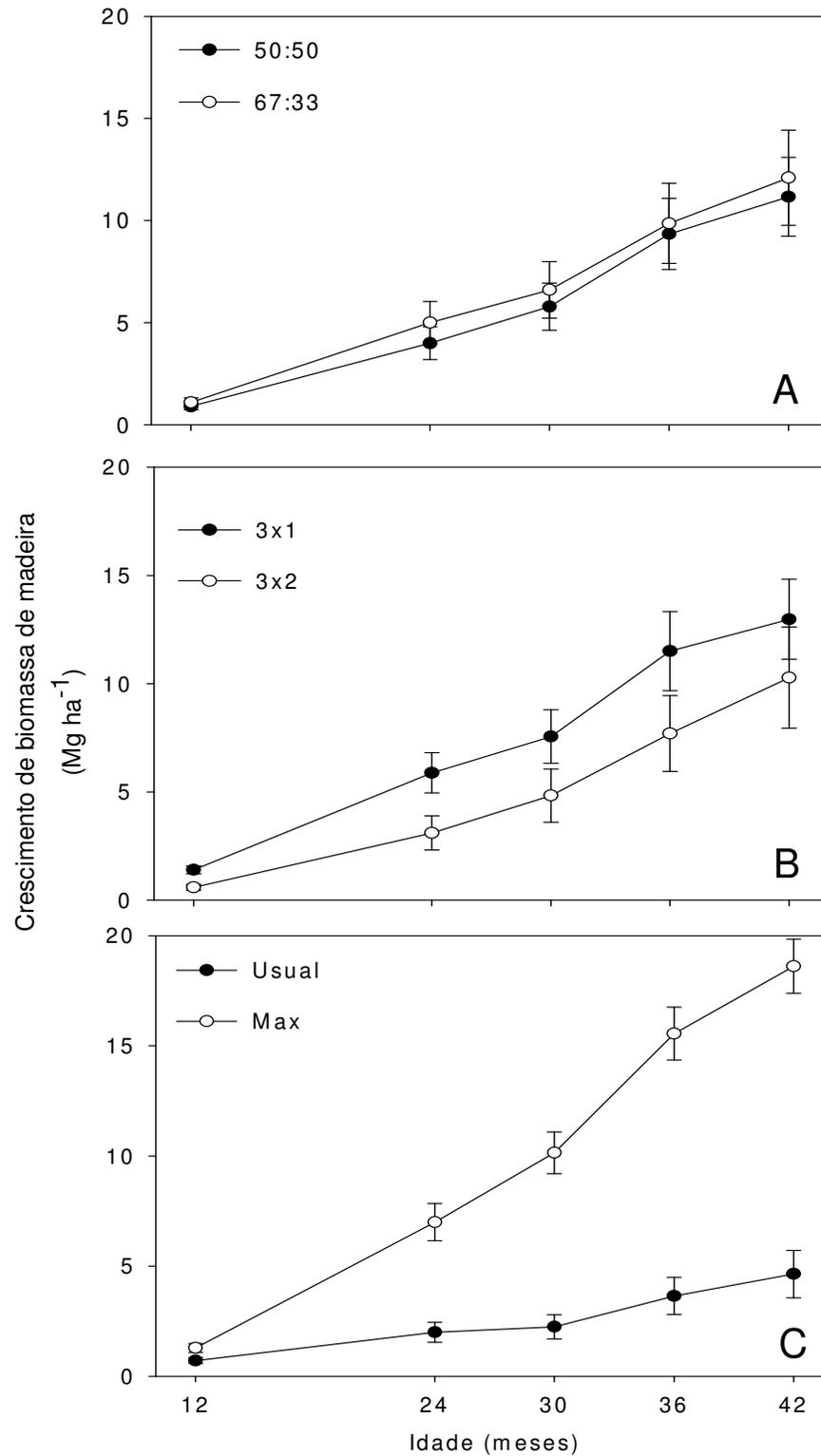


Figura 9 – Evolução do estoque de biomassa de madeira para os fatores: A – Composição; B – Espaçamento e C – Manejo, ao longo do período de avaliação. As barras representam o desvio padrão da média ( $n=16$ ).

Os manejos máximo e usual, neste ensaio, se diferenciam por dois tratamentos culturais básicos: i) nível de matocompetição e ii) taxas de fertilização. No entanto, até os 24 meses, a diferença básica entre os manejos foi devida somente à matocompetição (livre de ervas no manejo máximo, e com controle somente na linha no manejo usual), pois as fertilizações foram equivalentes até esta idade (base e cobertura). Após os 24 meses, além de estar livre de matocompetição, houve calagem e uma adubação de cobertura a mais para o manejo máximo.

Assim, analisando-se os estoques aos 24 meses (Tabela 8), nota-se que a eliminação da matocompetição possibilitou um ganho de estoque de 251% do manejo máximo em relação ao usual ( $7,0 \text{ Mg ha}^{-1}$  versus  $2,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ ). Vê-se assim que, conforme observado para outros ensaios e espécies arbóreas (LAMB; TOMLINSON, 1998), a matocompetição, notadamente com gramíneas  $C_4$  (*Brachiaria decumbens*), é um dos grandes problemas em restauração florestal, pois compete diretamente com as árvores pelos recursos de crescimento: água, nutrientes, e luz, além de possível efeito alelopático (TOLEDO et al., 2003). Além do efeito negativo da competição com as gramíneas invasoras, acresce-se o fato da ocorrência de déficit hídrico anualmente, por conseguinte, o manejo usual fica essencialmente sob estresse ambiental durante todo o ano.

Após os 24 meses, não se pode separar o efeito da matocompetição e da fertilização no que se refere ao maior crescimento das parcelas sob manejo máximo. Porém, pelo fato das florestas com manejo usual terem até os 42 meses ainda ocorrência de gramíneas, e devido à dinâmica sazonal de chuva, com déficit hídrico durante 3 a 5 meses, pode-se supor que as ervas continuem sendo o principal elemento que restringe o crescimento das parcelas sob manejo usual.

Como discutido anteriormente, o efeito do espaçamento passa a ter interação com o manejo, a partir dos 42 meses (Tabelas 6 e 7, e Figura 10).

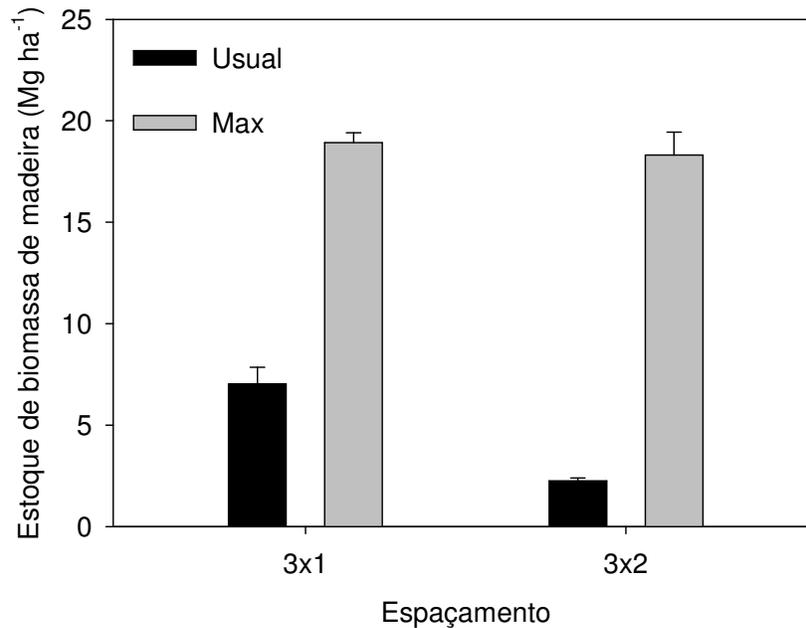


Figura 10 – Representação gráfica da interação entre os fatores Espaçamento x Manejo aos 42 meses, para a biomassa de madeira. As barras representam o desvio padrão da média ( $n=8$ ).

Observa-se claramente que a interação Espaçamento x Manejo é determinada pela maior responsividade do espaçamento 3 m x 2 m ao manejo máximo, ou seja, enquanto no manejo usual o espaçamento 3 m x 1 m tem maior crescimento, no manejo máximo as produções são equivalentes. Isto ocorre, provavelmente, devido à menor densidade de árvores no 3 m x 2m (1667 árvores/ha), com maior abertura do dossel e conseqüente maior incidência de luz para as gramíneas, comparativamente ao espaçamento 3 m x 1 m (3333 árvores/ha). Na ausência de gramíneas, que ocorre no manejo máximo, fica-se evidente que a densidade de 1667 árvores/ha já é suficiente para utilizar os recursos naturais do sítio (TOLEDO et al., 1999).

### 4.3 Produtividade primária líquida de madeira

Com base nos estoques de biomassa de madeira determinados aos 12, 24, 30, 36 e 42 meses (Tabela 6), foram calculadas as produtividades primárias líquidas de madeira (PPLM) para todos os tratamentos (Tabela 9).

Tabela 9 – Produtividade primária líquida de madeira ( $\text{Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ) para todos os tratamentos e idades, em ordem decrescente de produtividade aos 42 meses. Valores seguidos de mesma letra, por idade, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ( $P=0,05$ ).

Tratamentos	Produtividade primária líquida madeira ( $\text{Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ )			
	Idade (meses)			
	12	24	36	42
<b>67:33-3x2-Max</b>	1,0 ab	5,6 ab	8,7 a	10,5 a
<b>50:50-3x2-Max</b>	0,7 ab	3,5 abc	7,8 ab	8,7 ab
<b>67:33-3x1-Max</b>	2,0 a	7,5 a	8,3 a	7,6 ab
<b>50:50-3x1-Max</b>	1,4 ab	6,3 ab	9,4 a	7,0 ab
<b>50:50-3x1-Usu</b>	1,2 ab	2,1 bc	3,4 bc	4,7 bc
<b>67:33-3x1-Usu</b>	1,0 ab	2,0 bc	1,4 c	2,3 c
<b>67:33-3x2-Usu</b>	0,4 b	0,6 c	1,0 c	1,5 c
<b>50:50-3x2-Usu</b>	0,3 b	0,5 c	0,8 c	1,1 c

A Tabela 9 evidencia o grau de importância dos estudos sobre restauração florestal ao apontarem ganhos de produtividade, do melhor modelo em relação ao pior modelo, da ordem de 567%, 1400%, 1075% e 855%, aos 12, 24, 36 e 42 meses, respectivamente. Em todos os casos, o melhor modelo possui o manejo máximo, enquanto o pior modelo possui o manejo usual. Nota-se portanto que, pesquisas que versam sobre modelos de restauração, são altamente necessárias para aumentar o sucesso dos sistemas de restauração, em termos de sua eficácia e custos (PARROTTA et al., 1997; LAMB, 1998; TOLEDO; MATTOS, 2003).

Aos 24 meses, quando o efeito do manejo máximo restringia-se ao controle de plantas invasoras, a diferença na produtividade entre os extremos chegou a 1400% ( $7,5 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  versus  $0,5 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ) evidenciando o elevado grau de competição imposto pela *Brachiaria decumbens*, em restauração de áreas degradadas com pastagens. Lamb e Tomlinson (1998) ressaltam a necessidade do controle da matocompetição nos estágios iniciais de reflorestamentos de restauração de áreas degradadas sem banco de sementes.

A maior produtividade de madeira observada aos 42 meses ( $10,5 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ), no tratamento 67:33-3x2-Max, quando convertida pela densidade básica média obtida neste ensaio ( $0,41 \text{ g cm}^{-3}$ ), resulta em um incremento médio anual de  $26 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ .

Este valor, oriundo de árvores nativas, é maior do que produtividades de florestas de *Eucalyptus* da década de 60 (18 a 20 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>), durante o período de incentivos fiscais (GONÇALVES et al., 2007). Percebe-se assim, que pesquisas sobre práticas de restauração, incluindo aspectos das respostas das espécies nativas às práticas silviculturais, podem elevar expressivamente a produtividade e viabilidade dos plantios de restauração, não só para as áreas de preservação permanente, como também manejo em áreas de reserva legal. Tais números ampliam o potencial econômico destas restaurações (MELO; DURIGAN, 2006, 2007).

Essencialmente, só ocorreram interações entre os fatores aos 42 meses, com destaque para a interação Espaçamento x Manejo que foi altamente significativa (Tabela 10).

Tabela 10 – Valores de significância (*P*) pela análise de variância dos efeitos principais e das interações entre os fatores, para produtividade primária líquida de madeira, nas diversas idades.

Causas de Variação	Idade (meses)			
	12	24	36	42
<b>Composição</b>	<0,01*	0,06	0,37	0,80
<b>Espaçamento</b>	0,19	<0,01*	0,07	0,95
<b>Manejo</b>	<0,01*	<0,01*	<0,01*	<0,01*
<b>Composição x Espaçamento</b>	0,93	0,46	0,07	0,04*
<b>Composição x Manejo</b>	0,12	0,05*	0,46	0,02*
<b>Espaçamento x Manejo</b>	0,57	0,32	0,39	<0,01*
<b>Composição x Espaçamento x Manejo</b>	0,33	0,67	0,94	0,41

\* Significativo (*P*=0,05)

Com o intuito de avaliar o efeito dos níveis de cada fator sobre a produtividade das florestas de restauração, elaborou-se a Tabela 11 que mostra a PPLM nos diversos períodos, para o nível de cada fator.

Tabela 11 – Produtividade primária líquida de madeira ( $\text{Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ), por nível dos fatores. Valores seguidos da mesma letra, por idade e fator, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ( $P=0,05$ ).

Fator	Níveis	Produtividade primária líquida de madeira ( $\text{Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ )			
		Idade (meses)			
		12	24	36	42
Composição	50:50	0,9 a	3,1 a	5,4 a	5,4 a
	67:33	1,1 a	3,9 a	4,9 a	5,5 a
Espaçamento	3x1	1,4 a	4,5 a	5,6 a	5,5 a
	3x2	0,6 b	2,5 b	4,6 a	5,5 a
Manejo	Max	1,3 a	5,7 a	8,6 a	8,5 a
	Usual	0,7 b	1,3 b	1,7 b	2,4 b

Analisando a Tabela 11, pode-se confirmar que, ao longo de todo o experimento, o fator composição não influenciou na PPLM, como ilustrado na Figura 12 (gráfico A). Baseado neste resultado seria possível recomendar plantios com menor proporção de espécies pioneiras, que possuem ciclo de vida mais curto, resultando em maior diversidade nas espécies mais longevas usadas na restauração (KAGEYAMA et al., 2003).

Para o fator espaçamento, nas duas primeiras avaliações, o espaçamento 3 m x 1 m foi mais produtivo que o 3 m x 2 m (137% aos 12 meses e 77% aos 24 meses), contudo, após os 36 meses, a PPLM em ambos os espaçamentos se equivaleram (Figura 12, gráfico B). Nota-se assim, que a maior quantidade de árvores acelerou a ocupação do sítio, pelo aumento de área de copas, mas que já a partir dos 36 meses, o espaçamento 3 m x 2 m conseguiu atingir o mesmo patamar de produção. Este resultado tem aplicabilidade operacional na medida em que mostra que o espaçamento 3 m x 2 m, é mais econômico e tão produtivo quanto o 3 m x 1 m em idade ainda precoce (TOLEDO; MATTOS, 2003),

Avaliando a Tabela 11 é possível reforçar que o fator manejo foi o que mais favoreceu a produtividade de madeira. Os ganhos do manejo máximo atingiram 418% aos 36 meses ( $8,6 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  versus  $1,7 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ) e 253% aos 42 meses (8,5

Mg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> *versus* 2,4 Mg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>). Estes resultados mostram que florestas intensivamente manejadas, com maiores disponibilidades de água, nutrientes e luz podem obter ganhos expressivos na produtividade, resultando no rápido fechamento das copas e estabilização da área degradada em processo de restauração (PARROTTA et al., 1997; GONÇALVES et al., 2000).

Os efeitos dos fatores Composição, Espaçamento e Manejo sobre a produtividade primária líquida de madeira (PPLM) ao longo do período de avaliações estão apresentados na Figura 11.

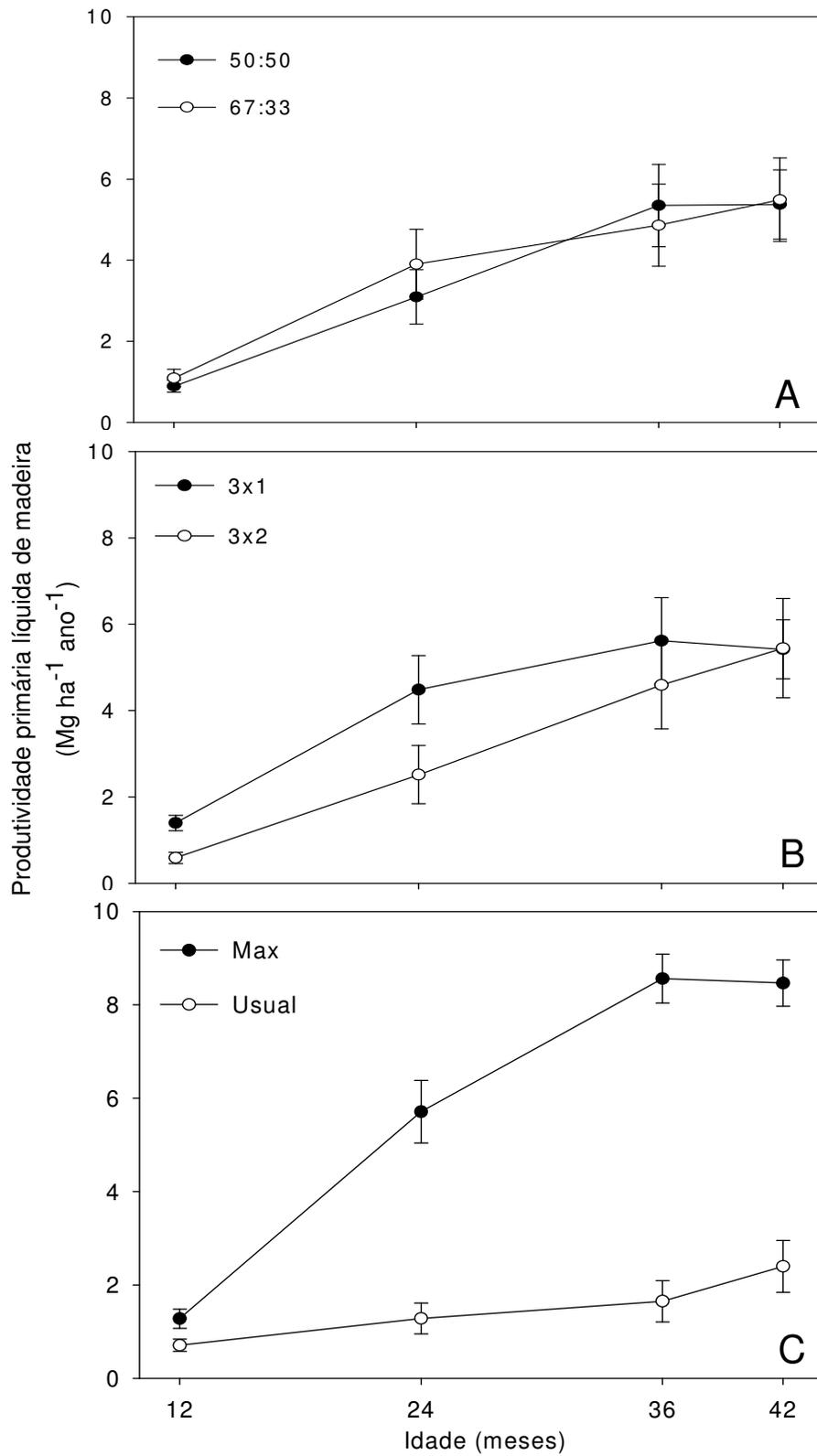


Figura 11 – Produtividade primária líquida de madeira (PPLM) para os fatores: A – Composição; B – Espaçamento e C – Manejo, ao longo do período de avaliação. As barras representam o desvio padrão da média ( $n=16$ ).

Como constatado na Figura 11 (gráfico C), o efeito do estresse ambiental causado pela matocompetição vem restringindo o desenvolvimento da floresta, pois a produtividade observada aos 12 meses para os tratamentos com manejo máximo ( $1,3 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ) só foi alcançada pelo manejo usual um ano depois, aos 24 meses. Novamente, fica destacado o potencial de crescimento e formação de copa das espécies nativas, evidenciando que, muitas vezes, tal potencial é neutralizado por más práticas de manejo. Nota-se ainda que a PPLM dos tratamentos com nível usual de manejo vem crescendo, de forma lenta, mas contínua, provavelmente devido ao crescimento lento, mas paulatino das copas. Assim, como observado por Stape et al. (2002), sistemas com poucos recursos de crescimento podem atingir a produtividade de sistemas com mais recursos quando as copas atingem a mesma estrutura. Neste caso, há ainda grande distância entre os modelos, e a permanência das gramíneas no sistema usual, além de restringir o crescimento, aumenta o risco de perda da restauração por efeito do fogo, quando da época de déficit hídrico. Desta forma, as práticas de controle de matocompetição, se mostram fundamentais para o sucesso da restauração (LAMB; TOMLINSON, 1998; TOLEDO et al., 1999).

A fotografia aérea da área experimental aos 18 meses de idade (Figura 12) ilustra claramente o efeito do fator manejo máximo sobre o desenvolvimento da copa, comparativamente ao manejo usual, com menos copas e ocorrência de gramíneas.

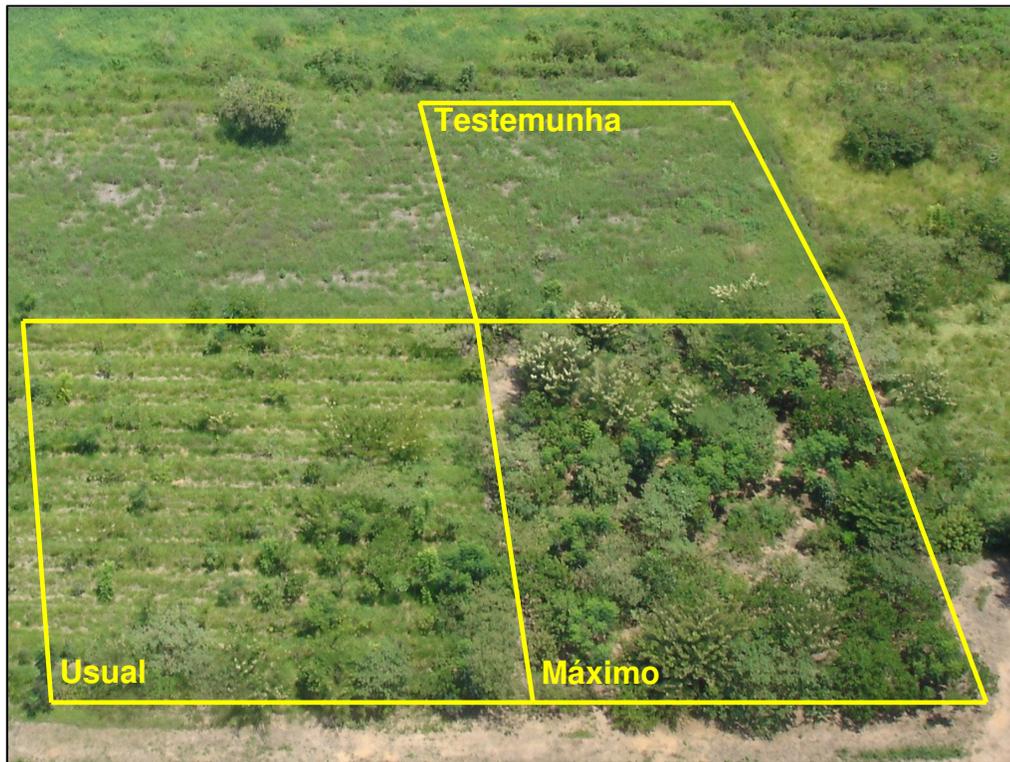


Figura 12 – Fotografia aérea de parte do Bloco 1, do experimento com 18 meses, evidenciando a maior rapidez no fechamento das copas das parcelas submetidas ao manejo máximo em relação ao manejo usual, e a presença de *Brachiaria decumbens* nas entrelinhas do manejo usual.

A Figura 13 ilustra a interação entre os fatores Composição x Manejo aos 24 meses (Tabela 10).

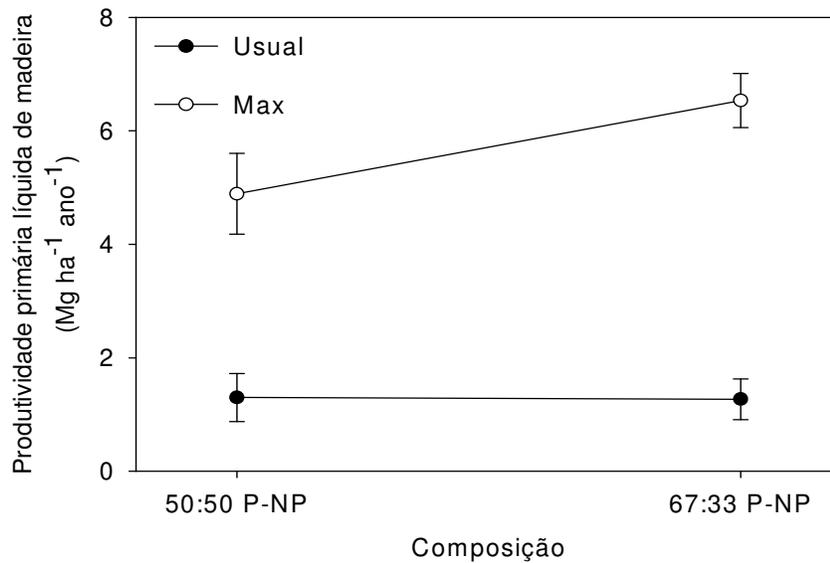


Figura 13 – Representação gráfica da interação Composição x Manejo aos 24 meses de idade, para valores de PPLM. As barras representam o desvio padrão da média ( $n=8$ ).

Como mostrado na Figura 13, as espécies pioneiras, presentes em maior número na composição 67:33, apresentam atividade fisiológica mais ativa do que as espécies não-pioneiras (IANNELLI-SERVIN, 2007), portanto, desempenham-se melhor em um ambiente totalmente livre de matocompetição como no manejo máximo, explicando provavelmente esta interação.

A Figura 14 apresenta as interações Composição x Manejo e Espaçamento x Manejo, observadas aos 42 meses.

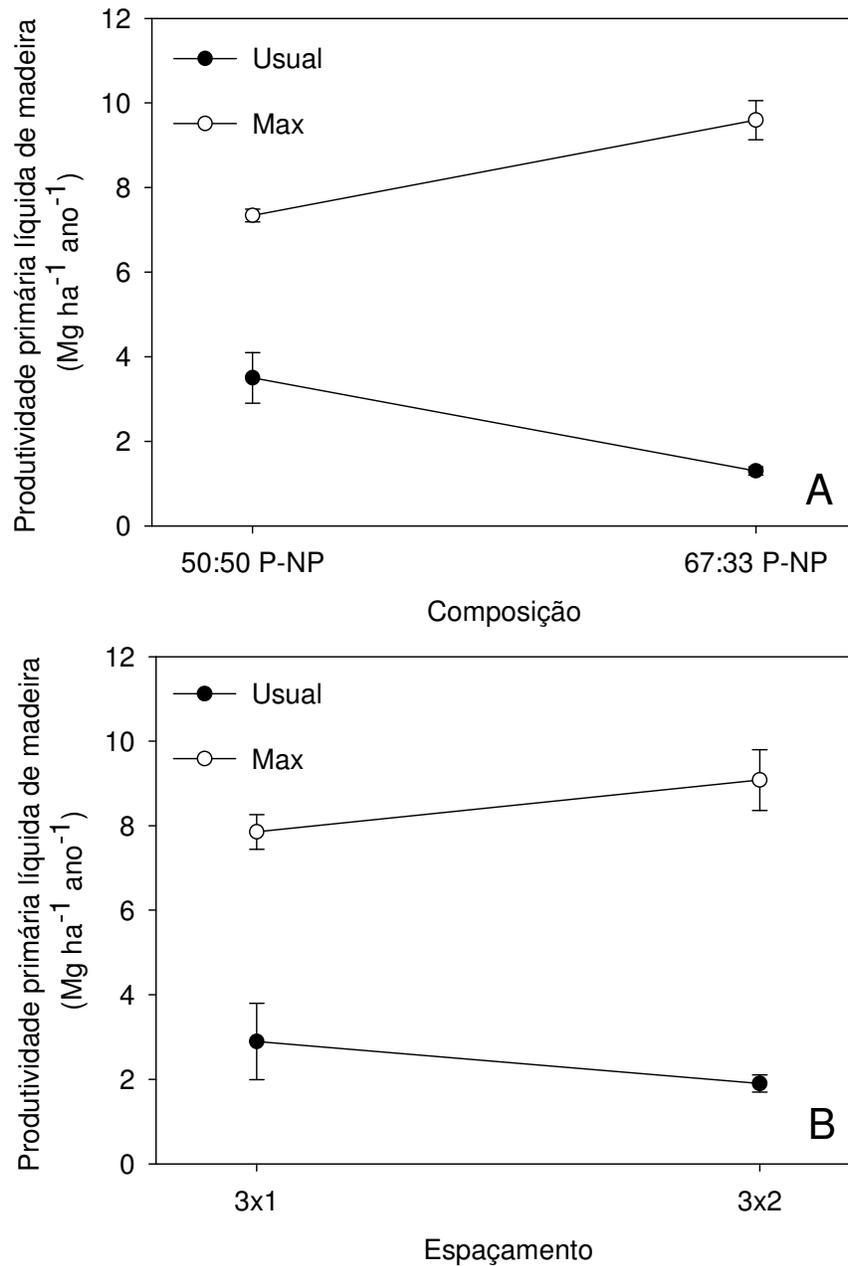


Figura 14 – Representação gráfica da interação entre os fatores A: Composição x Manejo, e B: Espaçamento x Manejo aos 42 meses, para valores de PPLM. As barras representam o desvio padrão da média ( $n=8$ ).

De forma similar ao ocorrido aos 24 meses (Figura 13), na Figura 14 (gráfico A), a interação Composição x Manejo foi observada devido à maior resposta da composição 67:33 ao manejo máximo, face, provavelmente, à maior atividade das

espécies pioneiras de rápido crescimento à maior disponibilidade de recursos (água, nutrientes e luz) (IANNELLI-SERVIN, 2007).

A interação Espaçamento x Manejo observada na Figura 14 (gráfico B), é devido à maior responsividade do espaçamento 3 m x 2 m ao manejo máximo, atrelado a sua menor densidade de plantio (1.667 árvores/ha) e menor dossel, resultando em mais luz para as gramíneas. Assim, no manejo máximo, sem gramíneas, esta densidade mostrou-se apta a utilizar os recursos naturais do sítio (TOLEDO et al., 2003).

Visando capturar o efeito da sazonalidade climática da região (Floresta Estacional Semidecidual) sobre a produtividade das florestas de restauração, a Tabela 12 foi elaborada calculando-se a produtividade primária líquida da madeira por semestre.

Tabela 12 – Produtividade primária líquida de madeira semestral ( $\text{Mg ha}^{-1} \text{ semestre}^{-1}$ ) dos 30 aos 42 meses, para todos os tratamentos. Valores seguidos da mesma letra, por idade, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ( $P=0,05$ ).

Tratamentos	Produtividade primária líquida semestral ( $\text{Mg ha}^{-1} \text{ semestre}^{-1}$ )		
	Idade (meses)		
	30 (jan-jun de 2006)	36 (jul-dez de 2006)	42 (jan-jun de 2007)
<b>67:33-3x2-Max</b>	3,5 a	5,2 ab	5,3 a
<b>50:50-3x2Max</b>	3,2 ab	4,6 ab	4,1 ab
<b>67:33-3x1-Max</b>	2,7 bc	5,6 ab	2,1 bc
<b>50:50-3x1-Usu</b>	0,7 c	2,7 bc	2,0 bc
<b>67:33-3x1-Usu</b>	0,1 c	1,3 c	1,0 c
<b>50:50-3x1-Max</b>	3,2 ab	6,2 a	0,9 c
<b>67:33-3x2-Usu</b>	0,1 c	0,9 c	0,6 c
<b>50:50-3x2-Usu</b>	0,1 c	0,7 c	0,4 c

A Tabela 12 evidencia a oscilação da produtividade ao longo dos semestres, sendo o período de julho a dezembro de 2006 o mais produtivo para todos os tratamentos, possivelmente, devido às melhores condições climáticas de crescimento. Como esperado, o manejo máximo, destaca-se como aquele em que se observam as maiores produtividades.

A análise de variância mostrou, pela Tabela 13, que houve efeito significativo do Manejo nas produtividades semestrais em todas as ocasiões, do Espaçamento aos 36 e 42 meses, e não havendo efeito da Composição em nenhuma idade. Além disso, só houve interação entre Manejo x Espaçamento aos 42 meses.

Tabela 13 – Valores de significância (*P*) das interações entre os fatores, para os valores de produtividade primária líquida de madeira semestral.

Fatores e interações	Idade (meses)		
	30 (jan-jun 2006)	36 (jul-dez 2006)	42 (jan-jun 2007)
<b>Composição</b>	0,69	0,37	0,25
<b>Espaçamento</b>	0,90	<0,01*	<0,01*
<b>Manejo</b>	<0,01*	<0,01*	<0,01*
<b>Composição x Espaçamento</b>	0,42	0,05*	0,44
<b>Composição x Manejo</b>	0,88	0,35	0,33
<b>Espaçamento x Manejo</b>	0,35	0,71	<0,01*
<b>Composição x Espaçamento x Manejo</b>	0,91	0,81	0,38

\* Significativo ( $P=0,05$ )

Para sintetizar o efeito dos níveis dos fatores Composição, Espaçamento e Manejo sobre a PPLM semestral nos três períodos avaliados (jan-jun de 2006; jul-dez de 2006 e jan-jun de 2007), foram elaboradas a Tabela 14 e a Figura 15.

Tabela 14 – Produtividade primária líquida de madeira semestral ( $\text{Mg ha}^{-1} \text{ semestre}^{-1}$ ), de 30 a 42 meses, por nível dos fatores. Valores seguidos da mesma letra, por idade e fator, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ( $P=0,05$ ).

		<b>Produtividade primária líquida de madeira (<math>\text{Mg ha}^{-1} \text{ semestre}^{-1}</math>)</b>		
		<b>Idade (meses)</b>		
<b>Fatores</b>	<b>Níveis</b>	<b>30 (jan-jun 2006)</b>	<b>36 (jul-dez 2006)</b>	<b>42 (jan-jun 2007)</b>
<b>Composição</b>	<b>50:50</b>	1,8 a	3,6 a	1,8 a
	<b>67:33</b>	1,6 a	3,3 a	2,2 a
<b>Espaçamento</b>	<b>3x1</b>	1,7 a	4,0 a	1,5 b
	<b>3x2</b>	1,7 a	2,9 b	2,7 a
<b>Manejo</b>	<b>Max</b>	3,2 a	5,4 a	3,1 a
	<b>Usual</b>	0,3 b	1,4 b	1,0 b

A Tabela 14 mostra que o fator composição não foi significativo sobre a produtividade dos plantios de restauração, evidenciando que apesar da maior capacidade de adaptação (alta flexibilidade) ao sítio (IANNELLI-SERVIN, 2007), plantios com maior proporção de espécies pioneiras não resultaram em ganhos na produtividade, para este estudo e faixa de proporção. Embasado neste raciocínio constata-se que, em áreas em avançado estágio de degradação, a escolha acertada de espécies que se adaptem ao estresse do ambiente é essencial para quebrar as barreiras que impedem os processos naturais de regeneração da floresta (ENGEL; PARROTTA, 2003).

Observa-se também que aos 36 meses, a produtividade do espaçamento 3 m x 1 m era 38% superior a do 3 m x 2 m ( $4,0 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ semestre}^{-1}$  versus  $2,9 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ semestre}^{-1}$ ), mas esta situação se inverteu aos 42 meses, quando o espaçamento 3 m x 2 m foi mais produtivo que o 3 m x 1 m ( $2,7 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ semestre}^{-1}$  versus  $1,5 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ semestre}^{-1}$ ). Este fato, associado a um semestre mais seco e idade mais velha, pode ser atribuída ao maior nível de competição por água entre as árvores no espaçamento 3 m x 1 m (3.333 árvores/ha), comparativamente às árvores do 3 m x 2 m, com metade desta densidade (HENSKENS et al., 2001).

Com base nos dados da Tabela 14, pode-se novamente verificar que o Manejo foi o fator que mais imprimiu efeito sobre a PPLM semestral, sendo que aos 36 meses o ganho na produtividade desta floresta de restauração, por influência positiva do manejo máximo foi de 286% ( $5,4 \text{ Mg ha}^{-1}\text{semestre}^{-1}$  *versus*  $1,4 \text{ Mg ha}^{-1}\text{semestre}^{-1}$ ), e de 210% aos 42 meses ( $3,1 \text{ Mg ha}^{-1}\text{semestre}^{-1}$  *versus*  $1,0 \text{ Mg ha}^{-1}\text{semestre}^{-1}$ ).

Estes resultados estão mostrados graficamente na Figura 15.

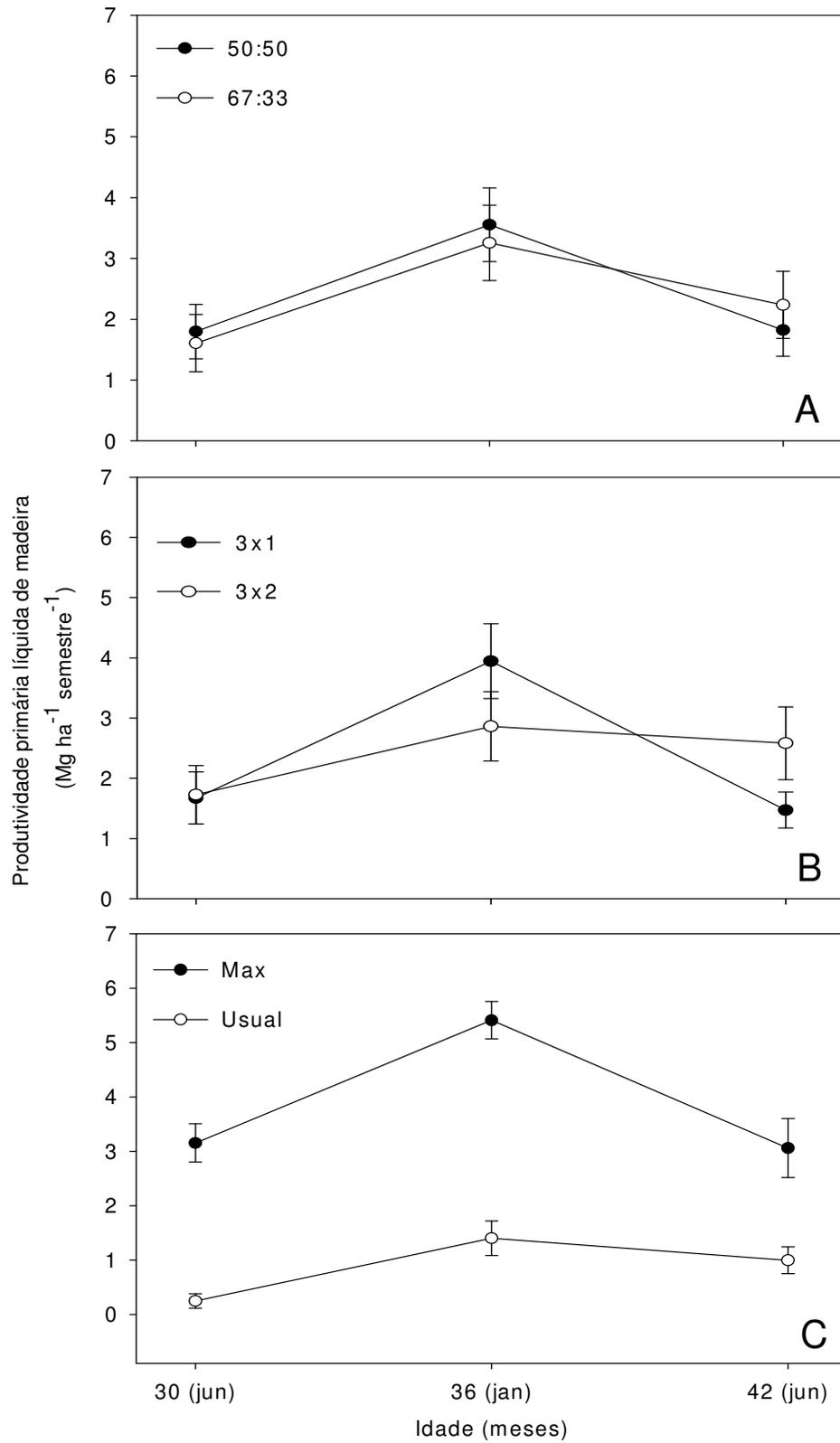


Figura 15 – Produtividade primária líquida de madeira semestral para os fatores: A – Composição; B – Espaçamento e C – Manejo, durante o período de 30 a 42 meses (jun/2006 a jun/2007). As barras representam o desvio padrão da média ( $n=16$ ).

Analisando o balanço hídrico calculado desde a implantação do experimento, constata-se que desde 2004 têm ocorrido déficits hídricos sistematicamente na área experimental (Figura 7), com duração de 3 a 5 meses por ano. Fundamentado nestes dados é possível supor que a menor PPLM (para todos os fatores) observada na idade de 42 meses, em relação aos 36 meses, foi causada pelo déficit hídrico acumulado de quase 60 mm durante os meses de abril, maio e junho de 2007 (LANDSBERG; GOWER, 1997), e nesta idade mais avançada, com maiores copas evapotranspirando.

No entanto, o espaçamento apresentou interação com o manejo (Tabela 13), o que pode ser visualizado na Figura 16.

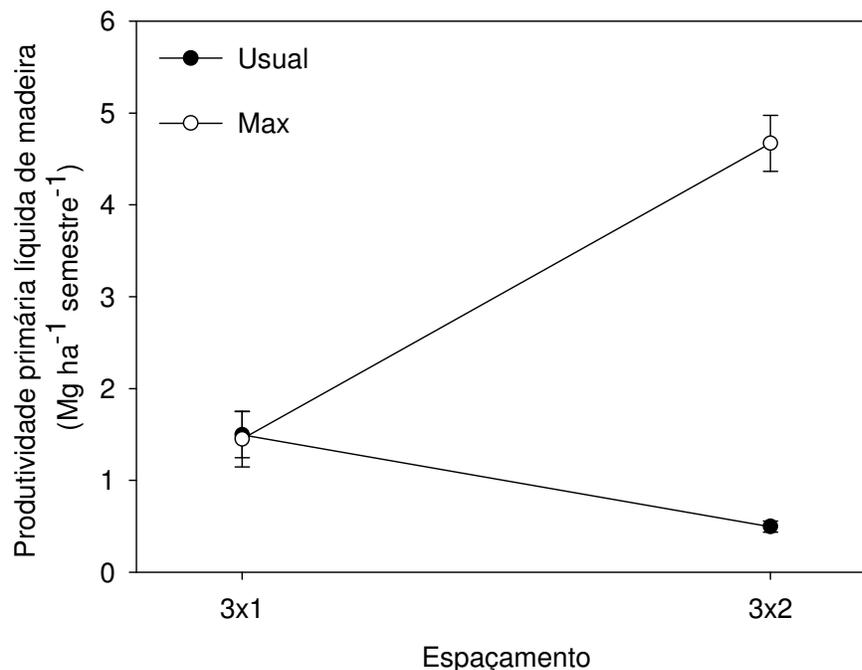


Figura 16 – Representação gráfica da interação entre Espaçamento x Manejo aos 42 meses, para valores de PPLM semestral. As barras representam o desvio padrão da média ( $n=8$ ).

A interação observada na Figura 16 volta a ser atribuída ao maior crescimento do espaçamento 3 m x 2 m, quando o mesmo é aliviado do estresses hídricos e nutricional, causado pela matocompetição existente no manejo usual. Este melhor resultado de crescimento devido à maior quantidade de recursos disponíveis para cada árvore no espaçamento 3 m x 2 m, não é provavelmente observada no espaçamento 3 m x 1 m,

pelo fato da intensa competição entre as árvores nestes tratamentos, nesta idade mais avançada (RONDON, 2002).

#### 4.4 Índice de área foliar

O índice de área foliar (IAF) foi avaliado por meio de fotografias hemisféricas, em janeiro e junho de 2007 (aos 36 e 42 meses de idade), para avaliar as respostas do dossel dos modelos de restauração florestal aos níveis dos fatores estudados.

Para calibrar as fotos hemisféricas, foram geradas regressões relacionando os valores reais da análise destrutiva realizada em campo e os valores dos índices de área de vegetação (IAV) obtidos por meio das análises das fotos hemisféricas. A melhor relação entre os dados foi obtida pelo modelo da eq.(14).

$$IAF = \exp\left[0,7871 + \left(\frac{-0,35817}{IAV}\right)\right] \quad (14)$$

Onde:

IAF: índice de área foliar ( $m^2 m^{-2}$ );

IAV: índice de área de vegetação ( $m^2 m^{-2}$ ).

A configuração que melhor relacionou os valores de IAF com os de IAV ( $r^2 = 0,73$ ,  $P < 0,0001$ ) foi determinada pelo método elipsoidal ponderado, com 5 anéis e 17 graus de abertura cada, 400 pixels de raio e sem qualquer tipo de correção. Este método baseia-se em Norman e Campbell (1989) e tem por teoria o modelo elipsoidal de distribuição do ângulo foliar. O algoritmo estima conjuntamente o IAV e o ângulo foliar, considerando que a transmissão da luz pelo dossel varia com o zênite do ângulo de incidência da radiação, ponderando os cálculos segundo a representatividade de cada anel no hemisfério (SCHLEPPI, 2007).

A equação de calibração gerada (eq.(14)), que foi utilizada para estimar os valores de IAF com base nos valores de IAV está apresentada na Figura 17.

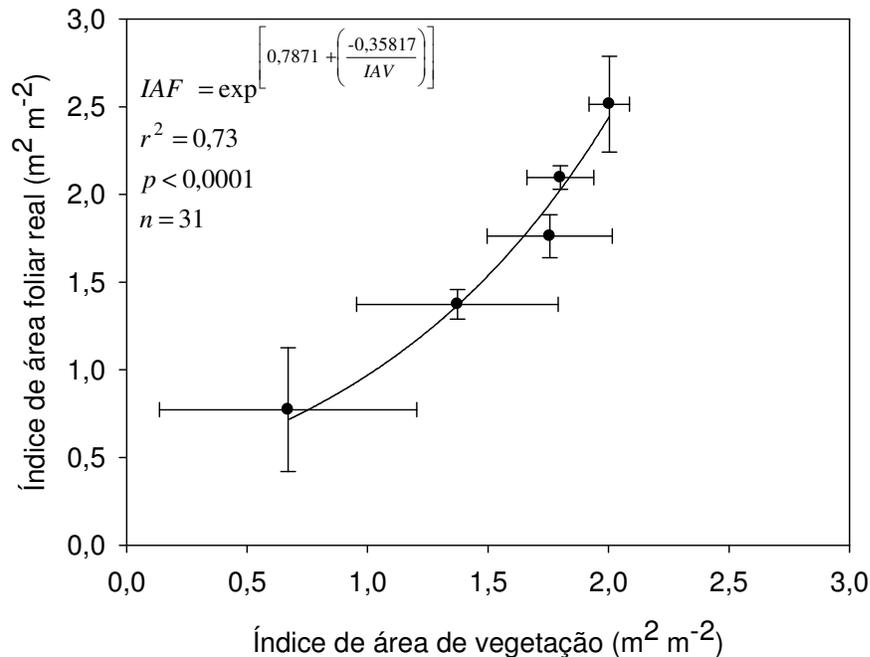


Figura 17 – Equação de calibração, relacionando o índice de área de vegetação (IAV), obtido pelo programa *Hemisfer*, e o índice de área foliar estimado (IAF). Os valores de IAF real e IAV associados foram agrupados a cada  $0,5 \text{ m}^2 \text{m}^{-2}$  de aumento no IAF, e as barras horizontais e verticais são os desvios padrões dos valores nestes intervalos.

Os valores de IAV calculados variaram em 10,1 vezes (de  $0,19$  a  $2,10 \text{ m}^2 \text{m}^{-2}$ ) e os IAF medidos variaram em 6,6 vezes (de  $0,37$  a  $2,82 \text{ m}^2 \text{m}^{-2}$ ). Em média, os valores de IAV fornecidos diretamente pelo programa *Hemisfer*, subestimaram os valores de IAF em 14%. Pela Figura 17 nota-se que as maiores variabilidades entre o IAV e o IAF ocorrem para IAF inferiores a  $1,5 \text{ m}^2 \text{m}^{-2}$ , como era esperado devido à rápida saturação da interceptação da luz com o aumento do IAF (BRÉDA, 2003). Assim, pode-se recomendar que no caso do uso de fotos hemisféricas, para IAF inferiores a  $1,5$ , devam ser tomadas mais fotos por parcela.

Após o processamento das fotos hemisféricas e posterior ajuste feito com a equação de calibração (eq.(14)), foi elaborada a Tabela 15, com valores de IAF obtidos aos 36 e 42 meses de idade, para todos os tratamentos.

Tabela 15 – Índice de área foliar e desvio padrão ( $m^2 m^{-2}$ ), aos 36 e 42 meses, para todos os tratamentos, ordenados de forma decrescente aos 36 meses. Valores seguidos da mesma letra, por idade, não diferiram estatisticamente pelo teste de Tukey ( $P=0,05$ ).

Tratamentos	Idade (meses)	
	36 (janeiro de 2007)	42 (julho de 2007)
	IAF ( $m^2 m^{-2}$ )	IAF ( $m^2 m^{-2}$ )
<b>50:50-3x1-Max</b>	1,79 ± 0,14 a	0,93 ± 0,06 a
<b>67:33-3x1-Max</b>	1,74 ± 0,08 a	0,97 ± 0,18 a
<b>50:50-3x2-Max</b>	1,65 ± 0,12 a	0,99 ± 0,23 a
<b>67:33-3x2-Max</b>	1,64 ± 0,23 a b	0,94 ± 0,22 a
<b>50:50-3x1-Usu</b>	1,03 ± 0,55 b	0,51 ± 0,42 a b
<b>67:33-3x1-Usu</b>	0,53 ± 0,39 c d	0,29 ± 0,29 b
<b>50:50-3x2-Usu</b>	0,20 ± 0,18 d	0,04 ± 0,04 b
<b>67:33-3x2-Usu</b>	0,15 ± 0,12 d	0,04 ± 0,06 b

Analisando a Tabela 15, observa-se que partindo da idade de 36 meses para 42 meses, ocorreu uma redução média no IAF de todos os tratamentos de 86%, e alguns tratamentos sob manejo usual tiveram os IAFs praticamente nulos em julho de 2007. Esta redução deve-se, provavelmente, ao déficit hídrico ocorrido durante os meses de abril, maio e junho de 2007, aliado à característica de caducifolia de algumas espécies implantadas no ensaio. Como relatado por Larcher (2006), a abscisão foliar observada em espécies caducifólias é uma estratégia fisiológica das plantas que visa reduzir a perda de água em resposta a períodos de déficit hídrico, resultando em queda da produtividade nos períodos de seca. Stape et al. (2008) observaram redução semelhante no IAF de plantios de *Eucalyptus* clonais (74%) em resposta a períodos de seca, mesmo não sendo esta uma espécie caducifólia, e o mesmo deve estar também ocorrendo para as espécies não caducifólias do ensaio.

De posse dos dados apresentados na Tabela 15, é possível afirmar que o fator manejo foi o mais influente sobre IAF, em ambas as idades, mostrando que a ausência das limitações impostas pelo estresse ambiental favoreceu expressivamente o desenvolvimento do dossel florestal, com reflexos positivos sobre a produtividade de tais plantios florestais de restauração (GOWER et al., 1999).

Como forma de exemplificar visualmente as diferenças no IAF impostas pelo fator manejo, na Figura 18 estão expostas fotografias hemisféricas de tratamentos com manejo máximo, com maior IAF, e usual, com menor IAF.

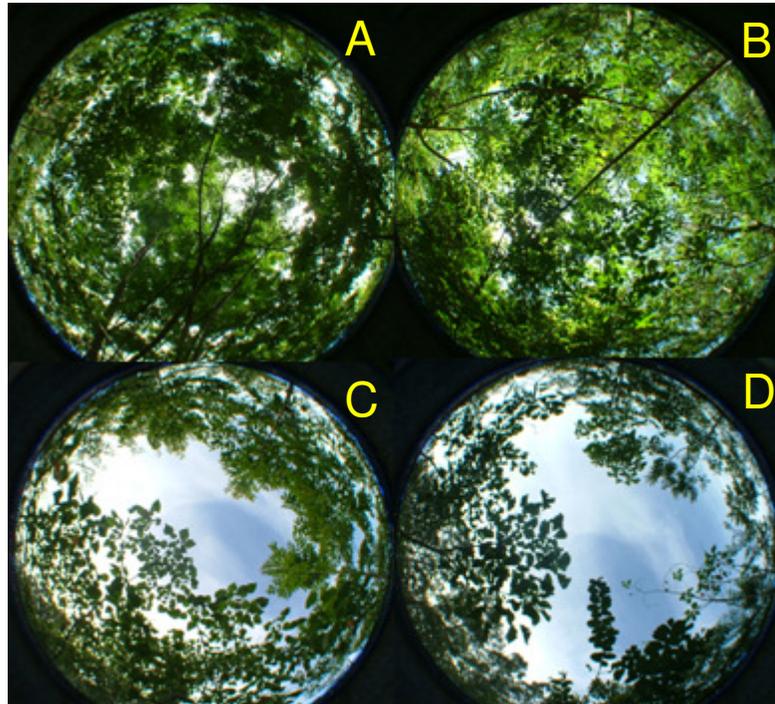


Figura 18 – Fotografias hemisféricas de plantios com composição 50:50 em espaçamento 3x1 aos 36 meses, evidenciando apenas a diferença na cobertura do dossel imposta pelo manejo máximo (A, B), com IAF de  $1,75 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$  em relação ao manejo usual (C, D), com  $0,78 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ .

Com base nos valores da Tabela 15, constata-se que o IAF, obtido neste ensaio para tratamentos com manejo máximo, apresentou média de  $1,7 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ , apenas 23% menor que o valor de  $2,1 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$  obtido por Litton et al. (2006) em florestas tropicais maduras do Havaí. Valor semelhante, de  $2,3 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ , foi obtido por Stape et al. (2008), para florestas clonais de *Eucalyptus* na mesma idade. Clark et al. (2008), estudando o IAF de uma floresta tropical úmida, supostamente em estágio clímax, na Costa Rica, obtiveram um valor médio de  $2,4 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$  para as espécies arbóreas. Com base nestes resultados, é importante salientar que o presente ensaio de restauração encontra-se em estágio de franco desenvolvimento, principalmente em parcelas submetidas ao manejo máximo, como mostrado na Figura 12 (gráfico C), apresentando ainda potencial de crescimento do IAF.

Estes dados mostram o grande potencial produtivo de espécies nativas e a premência de pesquisas que às caracterizem ecofisiologicamente, com o intuito de aperfeiçoar os modelos atuais de restauração florestal de áreas degradadas.

Para o índice de área foliar, houve interação Espaçamento x Manejo nas duas idades, 36 e 42 meses (Tabela 16), e visando avaliar o efeito dos níveis dos fatores sobre o IAF foi construída a Tabela 17.

Tabela 16 – Valores de significância (*P*) pela análise de variância dos efeitos principais e das interações entre os fatores, para o Índice de Área Foliar, em ambas as idades.

Fatores	Idade (meses)	
	36 (dez de 2006)	42 (jun de 2007)
<b>Composição</b>	0,06	0,50
<b>Espaçamento</b>	<0,01*	0,04*
<b>Manejo</b>	<0,01*	<0,01*
<b>Composição x Espaçamento</b>	0,11	0,68
<b>Composição x Manejo</b>	0,12	0,51
<b>Espaçamento x Manejo</b>	<0,01*	0,03*
<b>Composição x Espaçamento x Manejo</b>	0,20	0,32

\* Significativo ( $P=0,05$ )

Tabela 17 – Índice de área foliar aos 36 e 42 meses, para níveis dos fatores. Valores seguidos de letras iguais, por idade e fator, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ( $P=0,05$ ).

Fatores	Níveis	IAF ( $m^2 m^{-2}$ )	
		Idade (meses)	
		36 (dez de 2006)	42 (jun de 2007)
<b>Composição</b>	<b>50:50</b>	1,17 a	0,62 a
	<b>67:33</b>	1,01 b	0,56 a
<b>Espaçamento</b>	<b>3x1</b>	1,27 a	0,67 a
	<b>3x2</b>	0,91 b	0,51 b
<b>Manejo</b>	<b>Max</b>	1,71 a	0,96 a
	<b>Usu</b>	0,47 b	0,22 b

Nota-se, pela Tabela 17, que basicamente os três fatores tiveram efeito sobre o IAF em ambas as idades, com exceção da composição aos 42 meses.

A composição 50:50 mostrou maior IAF que a composição 67:33 (média de 0,90  $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$  versus 0,79  $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$ ), o que pode ser devido à maior caducifolia das copas das espécies pioneiras (LORENZI, 1992).

Analisando o fator espaçamento, em ambas as idades (36 e 42 meses), o espaçamento 3 m x 1 m resultou em maiores IAF que o espaçamento 3 m x 2 m (0,97  $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$  versus 0,71  $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$ ), porém houve efeito da interação Espaçamento x Manejo, que é analisada adiante.

Confirma-se que o nível de manejo máximo foi o que mais contribuiu para o IAF, com valor médio de 1,34  $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$ , enquanto o manejo usual se restringiu a um valor de 0,34  $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$ . Este elevado efeito do manejo máximo, associado ao controle de matocompetição e adubação, corrobora que o índice de área foliar é fortemente influenciado pelo estado nutricional e hídrico do sítio (HEDMAN; BINKLEY, 1988; NAMBIAR, 1990). Contudo, não se pode ignorar a influência do controle de plantas invasoras na respostas positivas de incremento do IAF às fertilizações. Como relatado por Beadle (1997), o efeito combinado de fertilização e controle de plantas invasoras no desenvolvimento do dossel de plantações florestais só ocorrerá se estas invasoras forem adequadamente controladas. Caso contrário, a forte competição imposta pelas gramíneas, no caso *Brachiaria decumbens*, aos recursos (água e nutrientes) reduzirá o efeito positivo da fertilização.

As interações mostradas na Tabela 16, entre Manejo x Espaçamento, aos 36 e 42 meses estão representadas graficamente na Figura 19.

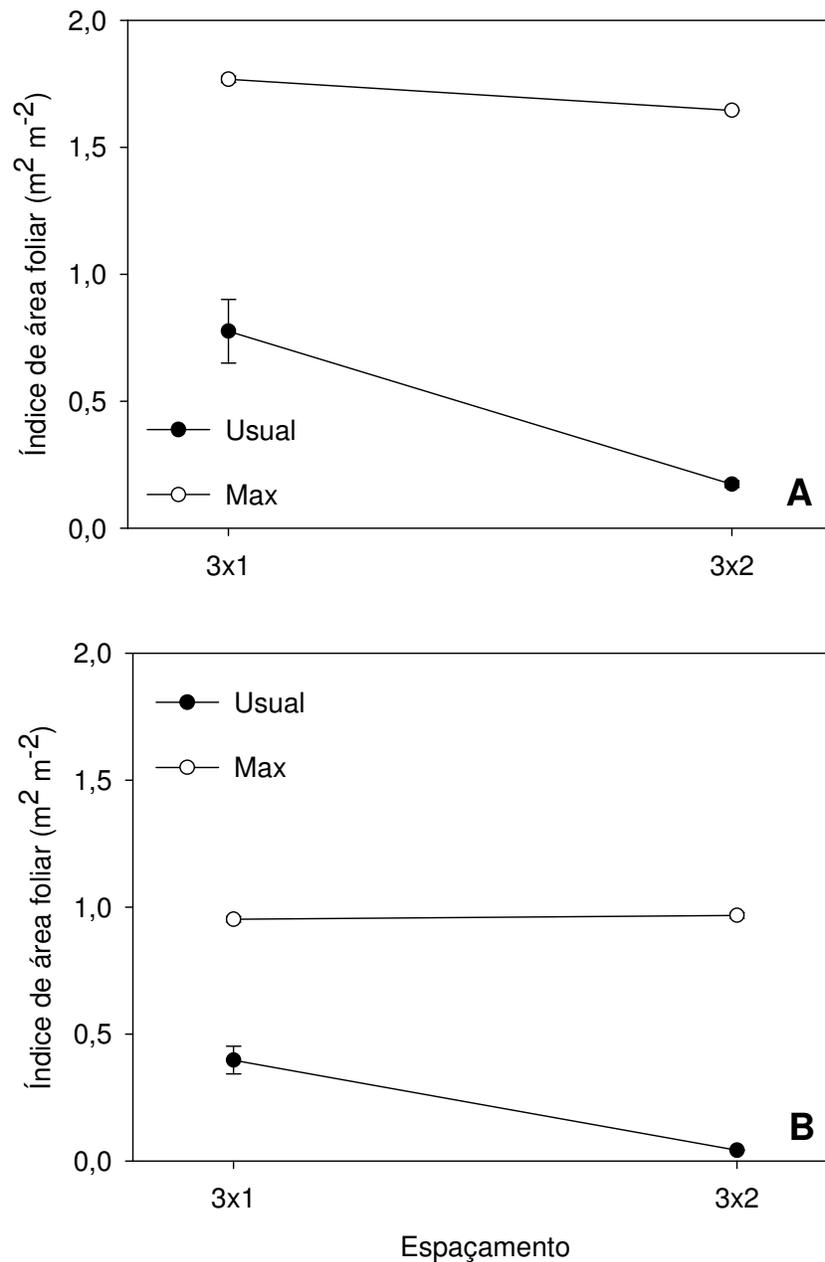


Figura 19 – Representação gráfica da interação entre os fatores Espaçamento x Manejo aos 36 (A) e 42 (B) meses de idade, para valores de IAF.

Na Figura 19 (gráfico A), a interação Espaçamento x Manejo aos 36 e 42 meses pode ser explicada pelo significativo aumento do IAF no espaçamento 3 m x 2 m, quando se faz a eliminação da matocompetição e adubação no manejo máximo, comparativamente ao espaçamento 3 m x 1m. Nota-se assim que, os IAFs que são potencialmente nestas idades em torno de 1,0 a 1,5  $m^2 m^{-2}$ , se reduzem a valores

menores que  $0,5 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ , quando sob manejo usual, e esta queda é mais abrupta no espaçamento  $3 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ , que possui menos indivíduos, e menos copa, possibilitando maior incidência de luz para as gramíneas invasoras  $C_4$ . Assim, o efeito danoso da competição sob manejo usual, por água e nutrientes, é mais intenso (BEADLE, 1997).

Sabe-se que o dossel florestal proporciona uma ligação dinâmica entre o ambiente biofísico e os processos fotossintéticos, que convertem a radiação fotossinteticamente ativa em produção de biomassa (MONTEITH, 1972). Esta relação foi observada no presente plantio de restauração florestal para os valores de índice de área foliar e a produtividade primária líquida de madeira semestral aos 36 meses, sendo graficamente representada pela Figura 20.

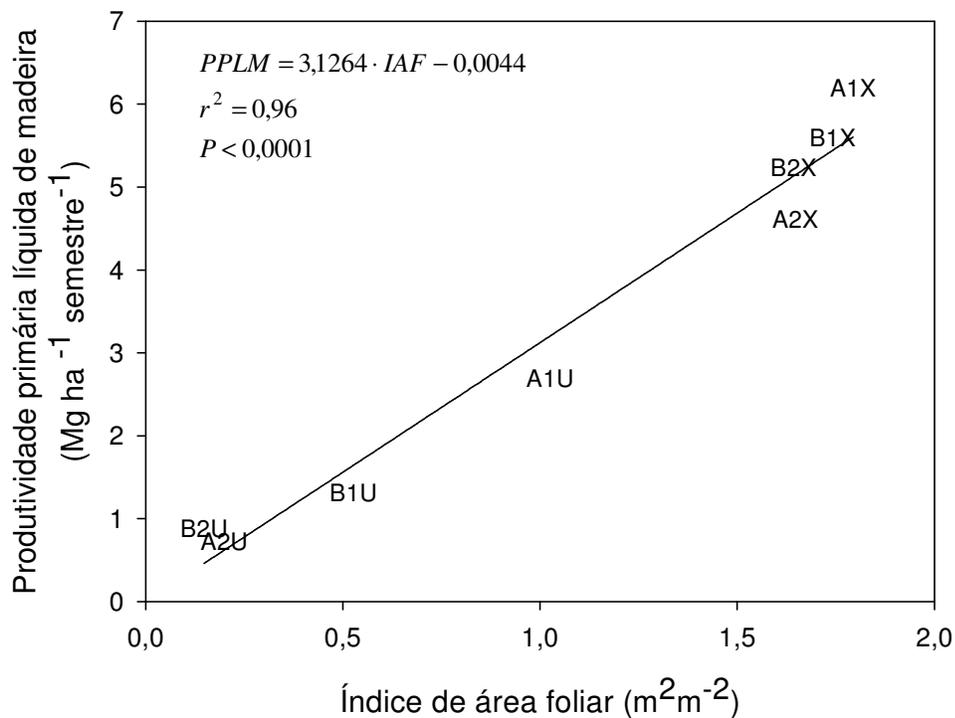


Figura 20 – Relação positiva e significativa entre a produtividade primária líquida de madeira (PPLM) semestral e o índice de área foliar (IAF) aos 36 meses de idade (janeiro, verão).

A Figura 20 mostra que existe alta correlação entre a PPLM e o IAF, pois como descrito em Beadle (1997), o IAF é o maior determinante da capacidade fotossintética de plantações florestais, devido a sua forte relação com a radiação fotossinteticamente

ativa interceptada pela floresta. A alta relação entre produtividade e IAF também foi obtida por Burrows (2003) em diferentes áreas florestadas nos EUA.

Os tratamentos com manejo usual apresentaram baixos valores de IAF e conseqüentemente tiveram a PPLM reduzida, provavelmente pela menor captura de luz (uso da luz), e pela competição por água e nutrientes devido às daninhas, reduzindo a eficiência de uso da luz capturada (LANDSBERG; WARING, 1997; STAPE et al., 2004a). Assim, na época de verão (janeiro), nota-se que para cada  $0,5 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$  de aumento no IAF, a produtividade primária líquida de madeira aumentou em  $1,65 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ semestre}^{-1}$ , ou  $4 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ semestre}^{-1}$ , evidenciando a nítida necessidade de dosséis bem formados para garantir a produtividade e qualidade das restaurações.

A Figura 21 representa graficamente a redução do IAF dos 36 para os 42 meses, ou seja, do verão (janeiro) para o inverno (junho). Foram avaliados somente espaçamento e manejo, devido à baixa influência obtida para o fator composição.

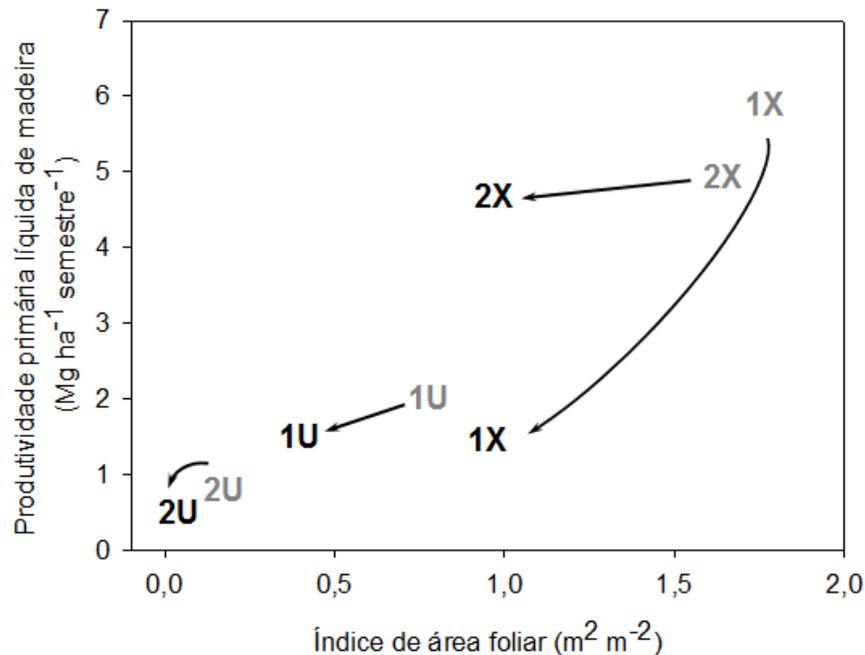


Figura 21 – Redução da PPLM semestral e do IAF, para o período de janeiro para junho de 2007, somente para os fatores significativos (Espaçamento e Manejo).

De modo geral, todos os tratamentos tiveram redução no IAF, e conseqüentemente na PPLM, em decorrência do déficit hídrico, da caducifolia ou da matocompetição (competição por água, luz e nutrientes). A maior redução foi

encontrada nos tratamentos com espaçamento 3 m x 1 m, e no manejo máximo, com redução de 86% no IAF e 307% na PPLM (1X na Figura 21). Tal fato provavelmente se deveu à elevada competição entre as árvores, pelo recurso hídrico na época seca, por consequência da alta densidade de plantio ( $3.333 \text{ árvores ha}^{-1}$ ), estressando sobremaneira os indivíduos. Nos tratamentos com espaçamento 3 m x 2 m, e manejo máximo, a queda foi bem menor, pois o nível de estresse de cada indivíduo era significativamente menor, pois em essência, cada árvore tinha o dobro de volume explorável de solo, comparativamente ao 3 m x 1 m (LANDSBERG; GOWER, 1997).

Embasado nos resultados apresentados (Figura 20), em Beadle (1997) e Stape et al. (2002), pode-se concluir que o dossel é o fator chave na produtividade florestal, sendo que o estudo de sua dinâmica relacionada a sazonalidade climática e estrutura tem grande potencial de uso como ferramenta de diagnóstico da qualidade de plantios de restauração florestal.

#### **4.5 Coeficiente de extinção de luz**

O cálculo do coeficiente de extinção ( $k$ ) de luz foi feito com medições realizadas em uma campanha aos 36 meses de idade. Durante as medições a radiação fotossinteticamente ativa incidente (RFA) média na área experimental foi de  $1.890 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , sendo mensurada continuamente no início e final da medição de cada parcela entre as 10:30 e 14:30 horas.

Devido à diferença no comportamento da transmissão da radiação através do dossel, dependente da estrutura da copa, calcularam-se dois fatores de extinção de luz, um para os tratamentos com manejo máximo e maior IAF ( $\text{IAF} > 1,60 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ ), e outro para os com manejo usual e menor IAF ( $\text{IAF} \leq 1,0 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ ) (Tabela 17). A Tabela 18 relaciona os resultados obtidos.

Tabela 18 – Valores de RFA incidente e transmitida, índice de área foliar estimado, proporção da RFA transmitida e fatores de extinção de luz (k) para os dois níveis do fator manejo. Os valores entre parênteses são referentes ao desvio padrão da média.

<b>Fator Manejo</b>	<b>RFA incidente</b> ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	<b>RFA transmitida</b> ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	<b>IAF</b> ( $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$ )	<b>RFA transmitida</b> (%)	<b>k</b> -
<b>Usual</b>	1.884	1.368 (377)	0,47 (0,48)	73,3 (20,9)	0,39
<b>Máximo</b>	1.895	243 (130)	1,71 (0,12)	12,9 (6,6)	0,75

A nítida diferença de valores dos dois coeficientes de extinção de luz evidencia, como descrito em Beadle (1997), que florestas plantadas com o menor nível de estresses ambientais possuem o dossel altamente estruturado, tanto em termos de altos valores de IAF, como distribuição ótima deste IAF ao longo do perfil horizontal, resultando na maior capacidade de absorção da RFA ao longo de suas sucessivas camadas de folhas. Assim, o maior valor de k para o manejo máximo reflete tal estruturação da copa.

A Figura 22 mostra a relação entre o IAF e a proporção da RFA transmitida pela incidente, resultando em diferentes coeficientes de extinção de luz, de acordo com o manejo.

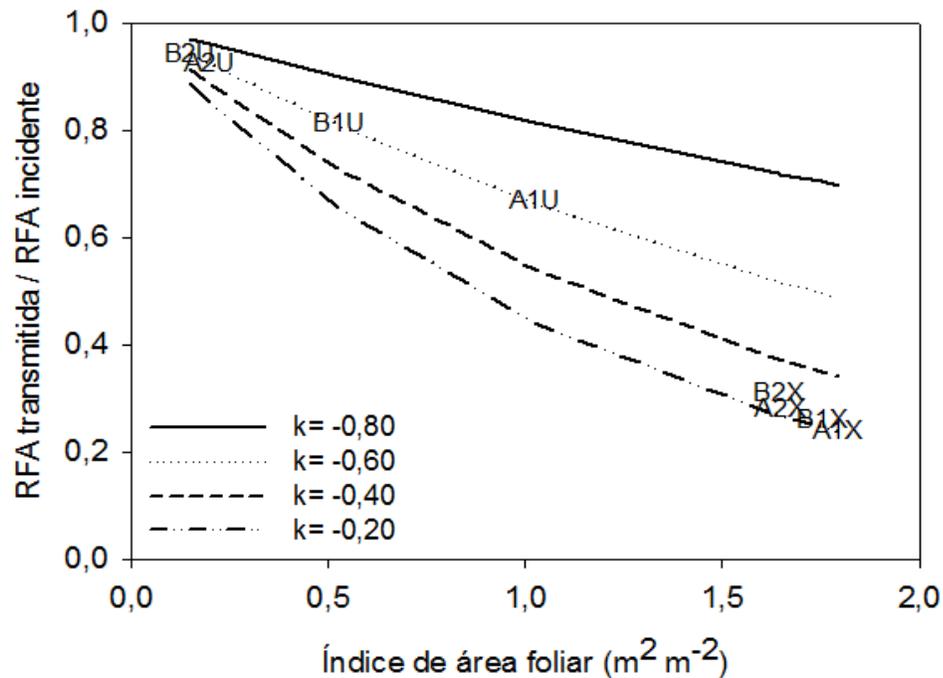


Figura 22 – Relação entre a proporção de radiação fotossinteticamente ativa transmitida (razão entre a  $RFA_{transmitida}$  pela  $RFA_{incidente}$ ) pelo dossel e o índice de área foliar. São apresentados os 8 tratamentos (A1X, A2X, B1X, B2X, A1U, A2U, B1U, B2U) aos 36 meses.

O valor calculado para as parcelas submetidas ao manejo usual ( $k=0,39$ ) é consistente com os valores apresentados por Stape (2002), obtido em plantios homogêneos de *Eucalyptus* clonais na região nordeste do Brasil, por Sands e Landsberg (2002), em plantações de *Eucalyptus globulus* na Austrália, e por Bréda (2003), em florestas plantadas e naturais de espécies de regiões temperadas e subtropicais. Já o valor calculado para parcelas submetidas ao manejo máximo ( $k=0,75$ ) está próximo de valores obtidos por Saldarriaga e Luxmoore (1991), em área em processo de sucessão na floresta Amazônica; por Wirth et al. (2001), em uma floresta tropical úmida na ilha de Barro Colorado-Panamá, e por Kitajima et al. (2005), para florestas tropicais com espécies que possuem a parte aérea plagiocrópica.

Estes dados mostram que o dossel das parcelas dos tratamentos manejados intensivamente, com apenas 36 meses, estão atenuando a RFA através das sucessivas camadas de folhas como uma floresta tropical natural.

#### 4.6 Radiação fotossinteticamente ativa interceptada

A lei de Beer-Lambert descreve a absorção da luz ao passar através do dossel florestal e mostra que a interceptação da radiação tende a saturar com o aumento do IAF (BEADLE, 1997, LANDSBERG; GOWER, 1997).

A radiação fotossinteticamente ativa interceptada (RFAI) foi calculada mensalmente, para o período de janeiro a junho de 2007. Para a realização dos cálculos o IAF foi estimado mensalmente seguindo o balanço hídrico do mesmo período. Considerou-se o valor de IAF, calculado em janeiro de 2007, constante até o mês de abril, enquanto ainda havia disponibilidade hídrica no solo. Para os meses seguintes, e para cada parcela, estabeleceu-se um decréscimo linear até atingir o IAF de junho (Figura 23).

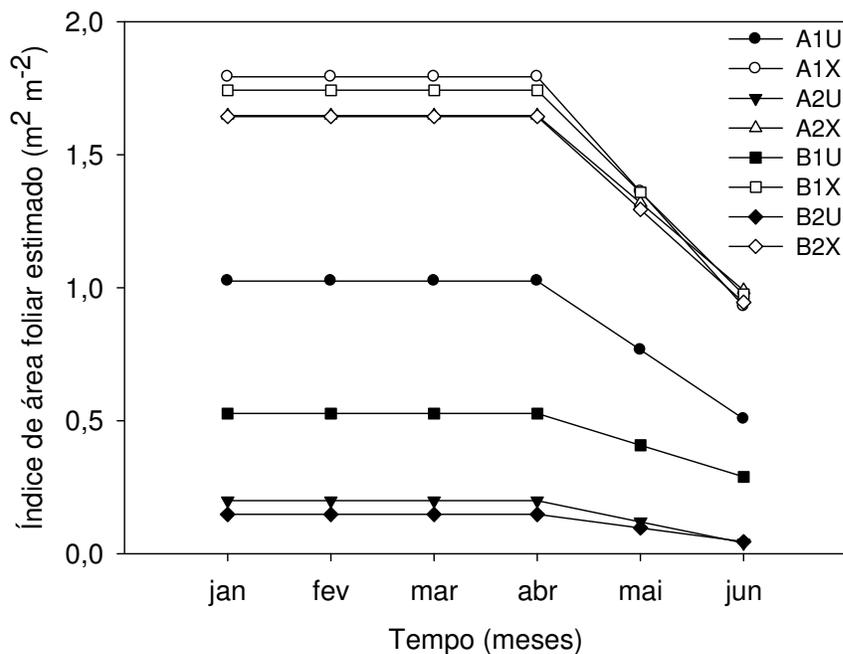


Figura 23 – Índice de área foliar calculado para os meses de janeiro a junho de 2007, para todas as parcelas, e ilustradas por tratamento, baseado no balanço hídrico do mesmo período.

Com a RFA estimada mensalmente (item 4.1), a evolução mensal do IAF de acordo com o balanço hídrico (Figura 23), e os coeficientes de extinção de luz dependentes do fator manejo (Tabela 18) foi calculada a radiação fotossinteticamente

ativa interceptada (RFAI) pelo dossel ao longo do primeiro semestre de 2007, para cada parcela. Os valores médios por tratamento são mostrados na Figura 24.

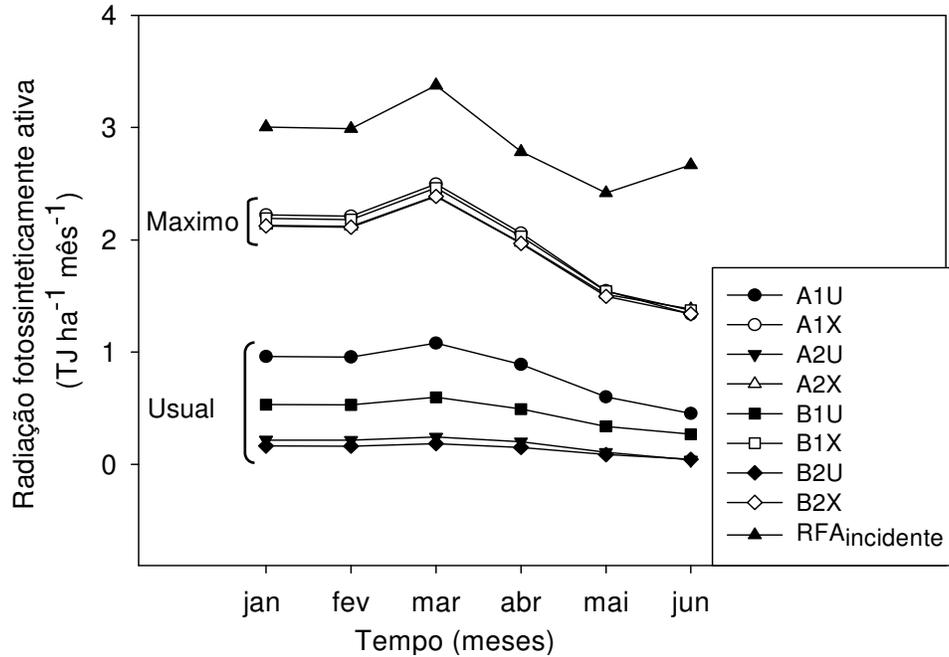


Figura 24 – Evolução mensal da radiação fotossinteticamente ativa incidente (RFA<sub>incidente</sub>) e a interceptada (RFAI) pelo dossel dos oito tratamentos, ao longo do primeiro semestre de 2007. Note-se a significativa diferença de interceptação entre o manejo máximo e usual.

Com a finalidade de avaliar de forma mais objetiva a quantidade de radiação interceptada por cada tratamento, fez-se a somatória da RFAI durante o primeiro semestre de 2007, que está apresentada na Figura 25.

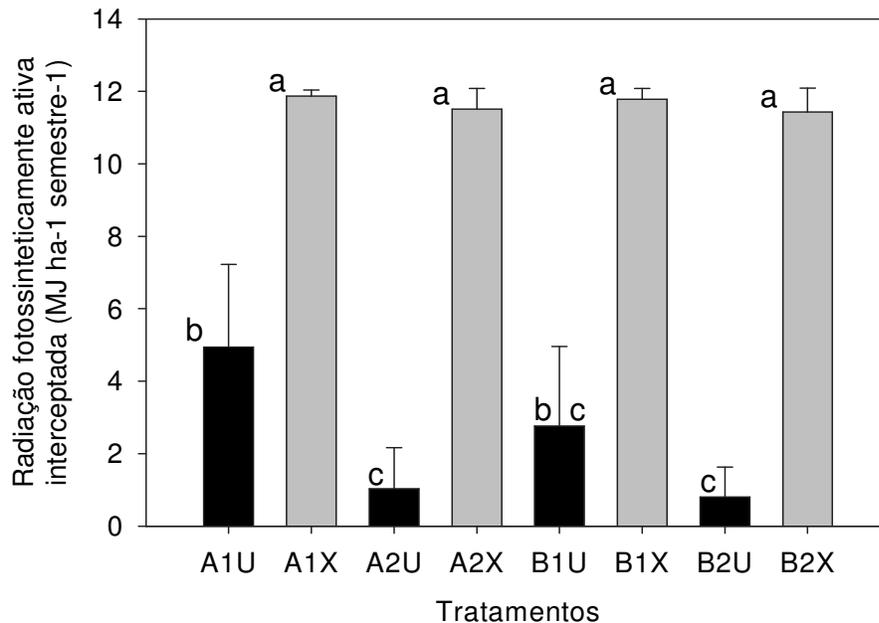


Figura 25 – Radiação fotossinteticamente ativa interceptada ( $\text{MJ ha}^{-1} \text{ semestre}^{-1}$ ) para os oito tratamentos durante o primeiro semestre de 2007 (colunas com letras iguais não diferem estatisticamente,  $P=0,05$ ). As colunas cinza receberam manejo máximo, e as colunas pretas manejo usual. As barras representam o desvio padrão da média.

A Figura 25 mostra que os tratamentos livres do estresse ambiental, por resultado do manejo máximo (colunas cinzas), foram capazes de formar um dossel melhor estruturado que o manejo usual, interceptando em média 68% de toda radiação fotossinteticamente ativa incidente na área experimental, enquanto que o melhor tratamento manejado de forma usual (A1U) interceptou apenas 29%.

Stape et al. (2004a) avaliando plantios de *Eucalyptus* clonais no sul da Bahia observaram que áreas com IAF de  $2,9 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$  e coeficiente de extinção de luz de  $-0,36$  interceptaram aproximadamente 65% da RFA, com produtividade média de madeira de  $16 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ . Já no presente ensaio, tratamentos submetidos ao manejo máximo com IAF de  $1,7 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$  e coeficiente de extinção de luz de  $-0,75$  absorveram, em média, 68% da RFA, com produtividade da madeira de  $8,5 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ . Embasado nestes dados confirma-se que há potencial significativo de aumento da qualidade e eficácia das restaurações com espécies nativas interferindo-se nas práticas de manejo que aliviam os estresses ambientais (IANNELLI-SERVIN, 2007).

Uma única interação entre os fatores Espaçamento x Manejo foi calculada para os valores de RFAI durante o período de 36 a 42 meses. Assim, a tabulação e análise

por fatores serão inicialmente efetuadas (Tabela 19), para posterior abordagem da interação.

Tabela 19 – Valores de significância (*P*) pela análise de variância dos efeitos principais e das interações entre os fatores, para os valores radiação fotossinteticamente ativa interceptada no período de janeiro a junho de 2007.

<b>Causas de Variação</b>	<b>Valor de <i>P</i></b>
<b>Composição</b>	0,10
<b>Espaçamento</b>	<0,01*
<b>Manejo</b>	<0,01*
<b>Composição x Espaçamento</b>	0,20
<b>Composição x Manejo</b>	0,15
<b>Espaçamento x Manejo</b>	<0,01*
<b>Composição x Espaçamento x Manejo</b>	0,20

\* Significativo (*P*=0,05)

Na Tabela 20, pode-se observar os efeitos dos níveis dos fatores Composição, Espaçamento e Manejo sobre a RFAI no período de 36 a 42 meses (janeiro a junho de 2007).

Tabela 20 – Radiação fotossinteticamente ativa interceptada ( $\text{TJ ha}^{-1}$  semestre<sup>-1</sup>) durante o período de janeiro a junho de 2007, e ganhos em RFAI, para os fatores e níveis. Valores seguidos da mesma letra, por fator, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey (*P*=0,05).

<b>Fatores</b>	<b>Níveis</b>	<b>Radiação fotossinteticamente ativa interceptada</b>	<b>Ganhos na RFAI</b>
		<b><math>\text{TJ ha}^{-1}</math> semestre<sup>-1</sup></b>	<b>%</b>
<b>Composição</b>	<b>50:50</b>	7,3 a	9
	<b>67:33</b>	6,7 a	-
<b>Espaçamento</b>	<b>3x1</b>	7,8 a	26
	<b>3x2</b>	6,2 b	-
<b>Manejo</b>	<b>Máximo</b>	11,6 a	383
	<b>Usual</b>	2,4 b	-

Considerando os valores da Tabela 20, podemos observar que a composição não teve efeito sobre a RFAI durante o período avaliado. Este resultado mostra que a recomendação de espécies pioneiras, visando rápido fechamento do dossel, redução do estresse ambiental e efeito “catalítico” para espécies não-pioneiras não se justifica, pelo menos para as 20 espécies e variação de proporção (50:50 a 67:33) estudada, discordando da teoria de Kageyama e Castro (1989), especificamente para esta situação.

Como esperado, o fator espaçamento foi significativo em termos de interceptação da RFA. O espaçamento 3 m x 1 m apresentou apenas 26% mais interceptação (uso da luz) do que o espaçamento 3 m x 2 m (HENSKENS et al., 2001), apesar de possuir 100% a mais de árvores por hectare. Este resultado, à semelhança das discussões anteriores, aponta que o espaçamento 3 m x 2 m mostra-se como o mais interessante do ponto de vista operacional, notadamente quando se garante bons tratos culturais.

Como para todas as outras variáveis, o fator Manejo proporcionou os maiores valores de RFAI, sendo que manejo máximo teve um ganho de 383% em relação ao manejo usual no uso da luz, acelerando o crescimento da floresta (BEADLE, 1997; STAPE et al., 2002).

A interação Espaçamento x Manejo está representada graficamente na Figura 26.

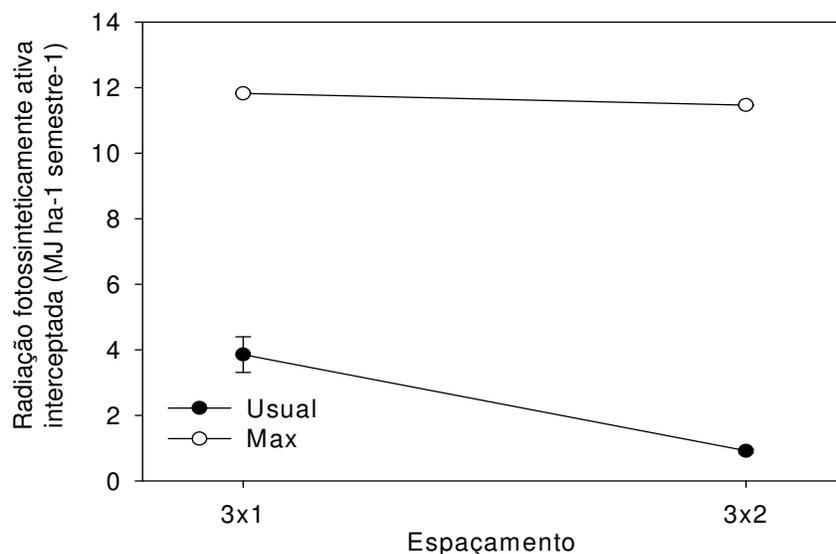


Figura 26 – Representação gráfica da interação entre os fatores Espaçamento x Manejo para valores de radiação fotossinteticamente ativa interceptada durante o período de janeiro a junho 2007.

A interação representada na Figura 26 mostra que o espaçamento 3 m x 2 m é mais penalizado pelo manejo usual do que o 3 m x 1 m. Isto ocorre, pois a baixa densidade populacional do espaçamento 3 m x 2 m, resulta em mais espaços livres para o desenvolvimento de gramíneas invasoras, elevando a competição por recursos naturais como água e nutrientes (LAMB; TOMLINSON, 1998; TOLEDO et al. 2003).

#### 4.7 Eficiência do uso da luz

Foi utilizada a abordagem da eficiência do uso da luz (ou modelo épsilon), pois como relatado por Beadle (1997) esta é uma importante ferramenta para interpretação de estudos comparativos, como o presente experimento que avalia os fatores Composição, Espaçamento e Manejo.

As eficiências de uso da luz (EUL = PPLF/RFAI), calculada para o primeiro semestre de 2007, para os 8 tratamentos, estão apresentadas na Tabela 21.

Tabela 21 – Eficiência do uso da luz e desvio padrão ( $\text{Mg TJ}^{-1}$ ) no período de janeiro a junho de 2007, para todos os tratamentos, em ordem decrescente. Os valores seguidos da mesma letra não diferiram estatisticamente pelo teste de Tukey ( $P=0,05$ ).

Tratamentos	Eficiência do uso da luz ( $\text{Mg TJ}^{-1}$ )
	janeiro a junho de 2007
67:33-3x2-Max	0,46 ± 0,11 a
50:50-3x1-Usu	0,39 ± 0,10 ab
50:50-3x2-Max	0,35 ± 0,11 ab
67:33-3x1-Usu	0,29 ± 0,24 ab
67:33-3x1-Max	0,18 ± 0,15 ab
50:50-3x2-Usu	0,14 ± 0,17 ab
50:50-3x1-Max	0,07 ± 0,05 ab
67:33-3x2-Usu	0,04 ± 0,07 b

Os valores mostrados na Tabela 21 são conflitantes com a afirmação feita por Field (1991) de que a EUL é uma variável que mostra tendência a ser relativamente similar entre os ecossistemas e espécies. Neste estudo, todas as parcelas tiveram as mesmas 20 espécies nativas, porém, em diferentes proporções e sob diferentes

manejos, resultando numa variação de eficiência de uso da luz de mais de 1000% (0,46 Mg TJ<sup>-1</sup> versus 0,04 Mg TJ<sup>-1</sup>) para os tratamentos sob manejo máximo e usual, no espaçamento 3 m x 2 m, e com proporção de 67:33 de pioneiras:não-pioneiras. Este resultado corrobora o relato de Gower et al. (1999) sobre plantios agrícolas ou florestais serem mais eficientes no uso do recurso luz (RFA) quando sob menores níveis de estresses ambientais.

Basicamente, houve apenas uma interação significativa, entre Espaçamento x Manejo (Tabela 22).

Tabela 22 – Valores de significância (*P*) pela análise de variância dos efeitos principais e das interações, para os valores de eficiência do uso da luz no período de janeiro a junho de 2007.

<b>Causas de Variação</b>	<b>Valor de <i>P</i></b>
<b>Composição</b>	0,97
<b>Espaçamento</b>	0,79
<b>Manejo</b>	0,30
<b>Composição x Espaçamento</b>	0,99
<b>Composição x Manejo</b>	0,05
<b>Espaçamento x Manejo</b>	<0,01*
<b>Composição x Espaçamento x Manejo</b>	0,99

\* Significativo (*P*=0,05)

A Tabela 23 foi elaborada para observar os efeitos dos níveis dos fatores Composição, Espaçamento e Manejo sobre os resultados de eficiência do uso da luz.

Tabela 23 – Eficiência do uso da luz (Mg TJ<sup>-1</sup>) durante o primeiro semestre de 2007 (janeiro a junho), por nível dos fatores. Os valores seguidos de letras iguais não diferiram estatisticamente pelo teste de Tukey (*P*=0,05).

<b>Fatores</b>	<b>Níveis</b>	<b>Eficiência do uso da luz</b>
		<b>Mg TJ<sup>-1</sup></b>
<b>Composição Florística</b>	<b>50:50</b>	0,24 a
	<b>67:33</b>	0,24 a
<b>Espaçamento de Plantio</b>	<b>3x1</b>	0,23 a
	<b>3x2</b>	0,25 a
<b>Manejo Silvicultural</b>	<b>Máximo</b>	0,27 a
	<b>Usual</b>	0,21 a

Os valores de EUL observados (em média  $0,24 \text{ Mg TJ}^{-1}$ ) são bastante coerentes, se comparados a valores de florestas tropicais naturais decíduas ( $0,23 \text{ Mg TJ}^{-1}$ ) e não decíduas ( $0,21 \text{ Mg TJ}^{-1}$ ) (GOWER et al., 1999), porém, relativamente baixos se comparados a florestas tropicais plantadas de rápido crescimento, que são cerca de 2 a 3 vezes mais eficientes:  $0,54$  a  $1,14 \text{ Mg TJ}^{-1}$  (STAPE et al., 2004a; STAPE et al., 2008).

Não houve diferença significativa entre os níveis dos 3 fatores em estudo sobre a EUL. Com relação ao espaçamento, a independência deste fator sobre a EUL também foi observada por Henskens et al. (2001) que constatou que apesar do maior índice de área foliar, e maior RFAI em plantios mais adensados, a EUL se manteve invariável.

Apesar de não ter sido constatada diferença significativa para nenhum fator de estudo, a superioridade da EUL sob manejo máximo é de 29% em relação ao usual, apontando que a EUL decresce com o aumento dos estresses do ambiente (RUNYON et al., 1994), neste caso proporcionado pela competição com plantas invasoras e restrição nutricional.

No entanto, a interação Espaçamento x Manejo na eficiência de uso da luz impõe uma análise mais criteriosa desta variável ecofisiológica, mostrada na Figura 27.

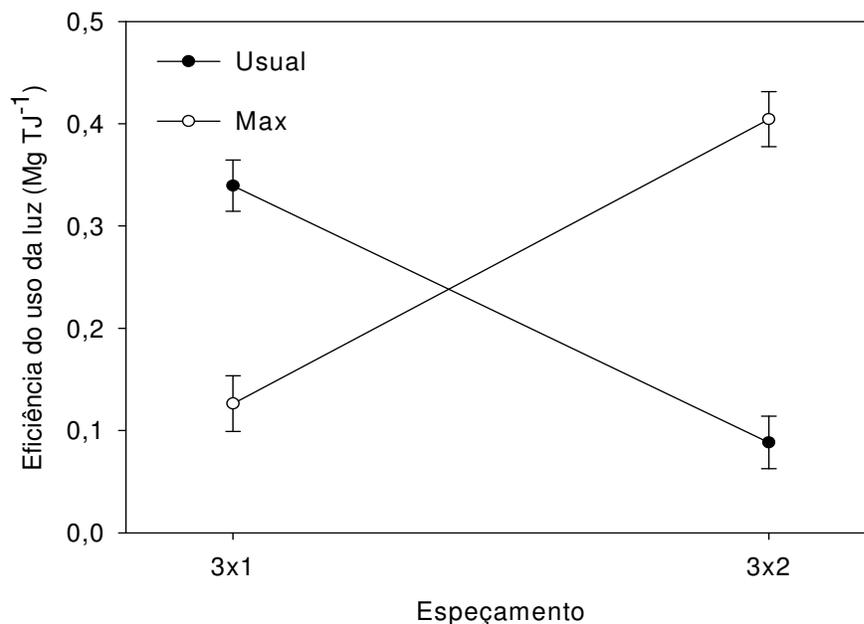


Figura 27 – Representação gráfica da interação entre os fatores Espaçamento x Manejo, para valores de eficiência do uso da luz do período de janeiro a junho de 2007.

A Figura 27 aponta uma típica interação Espaçamento x Manejo para a eficiência do uso da luz neste estudo de restauração em áreas degradadas. Enquanto que para o espaçamento 3 m x 2 m, a EUL aumenta 344% com o uso do manejo máximo comparativamente ao usual (de 0,09 Mg TJ<sup>-1</sup> para 0,40 Mg TJ<sup>-1</sup>), para o espaçamento 3 m x 1m, esta eficiência se reduz do manejo usual para o manejo máximo (de 0,34 Mg TJ<sup>-1</sup> para 0,12 Mg TJ<sup>-1</sup>).

A provável explicação do aumento da EUL com a aliviação do estresse no espaçamento 3 m x 2 m, deve-se ao fato de que nesta densidade de plantio, as árvores não estão competindo entre si, e estão ainda aumentando o uso de recursos do sítio, ocupando-o. Quando há eliminação da matocompetição e adubação, não só as árvores produzem mais copas (maior IAF, Figura 19), mas estas copas passam a ser fisiologicamente mais ativas (maior EUL). Está maior atividade das copas está provavelmente relacionado à maior disponibilidade hídrica e nutricional aos indivíduos, como descrito em Beadle (1997) e Gower et al. (1999).

No entanto, no espaçamento 3 m x 1 m, a maior densidade de árvores força-as a estarem em maior competição, assim, embora haja um aumento do IAF por efeito da menor competição com as ervas (Figura 19), a competição entre as árvores, notadamente durante o déficit hídrico, faz com que a EUL caia por efeito do fechamento dos estômatos ou indução precoce da caducifolia (LARCHER, 2006).

De qualquer forma, nota-se que o aumento da EUL no espaçamento 3 m x 2 m, é muito mais expressivo do que a queda da EUL no 3 m x 1 m, levando a uma tendência geral do ensaio de que as florestas mais produtivas possuem maior EUL, como mostra a Figura 28.

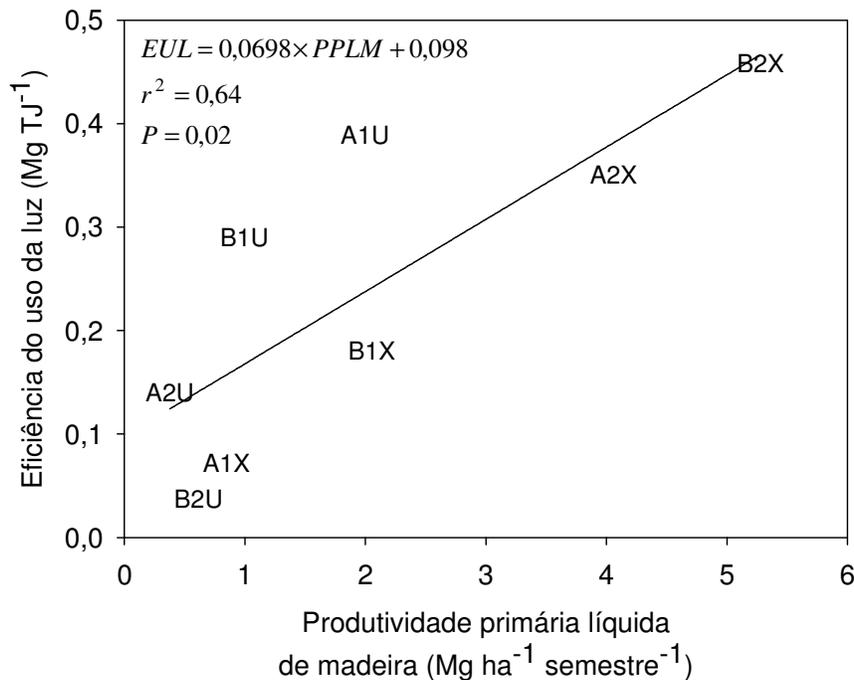


Figura 28 – Relação entre eficiência do uso da luz (EUL) e produtividade primária líquida de madeira (PPLM) semestral, ambas referentes ao período de janeiro a junho de 2007. Também a equação da reta, coeficiente de determinação e valor de significância ( $P$ ).

Pelas Figuras 19 e 20, nota-se que, em média, as minimizações dos estresses de competição e nutricionais tendem a elevar o índice de área foliar, e conseqüentemente a produtividade primária líquida de madeira. O que a Figura 28 mostra, é que este aumento de produtividade não é um efeito apenas do IAF, mas também da melhoria do estado fisiológico destes dosséis, com aumento da EUL. No caso do espaçamento 3 m x 2 m, os efeitos foram multiplicativos, ou seja, aumento do IAF e aumento da EUL. No caso do espaçamento 3 m x 1m, o efeito foi basicamente do aumento do IAF, mas queda ou manutenção da EUL, por efeito da restrição hídrica em nível de indivíduo. Estes dados corroboram autores que propõe o uso de EUL variáveis e moduladas por fatores ambientais, em oposição à idéia de EUL constantes por tipo de floresta (FIELD, 1991; GOWER et al., 1999; STAPE et al., 2004, 2008).

#### 4.8 Associação entre nitrogênio, área foliar e produtividade

Os estudos relacionados à nutrição das copas foram realizados aos 36 meses de idade (janeiro de 2007) quantificando-se o conteúdo de nitrogênio no dossel na época de máxima atividade fisiológica das mesmas.

Inicialmente foi determinada a concentração do elemento nitrogênio nas folhas ( $\text{g kg}^{-1}$ ) de todos os tratamentos. Com estes dados, o IAF ( $\text{m}^2\text{m}^{-2}$ ) e a área foliar específica (AFE,  $\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$ ) foram calculados os conteúdos de nitrogênio no dossel de cada parcela ( $\text{g N por m}^2$  de solo). Os valores da concentração do nitrogênio na folhas e do conteúdo de nitrogênio no dossel, para todos os tratamentos estão apresentados na Tabela 24.

Tabela 24 – Concentração de nitrogênio nas folhas e desvio padrão ( $\text{g kg}^{-1}$ ), e conteúdo de nitrogênio no dossel e desvio padrão ( $\text{gN m}^{-2}$ ), para todos os tratamentos. Ordem decrescente dos conteúdos. Valores seguidos de letras iguais, nas colunas, não diferiram estatisticamente pelo método de Tukey ( $P=0,05$ ).

Tratamentos	Nitrogênio foliar	Nitrogênio no dossel
	$\text{g N Kg}^{-1}$ folha	$\text{g N m}^{-2}$ solo
<b>67:33-3x1-Max</b>	29,93 $\pm$ 6,61	6,44 $\pm$ 2,51 a
<b>50:50-3x1-Max</b>	28,76 $\pm$ 5,88	5,97 $\pm$ 1,58 a
<b>67:33-3x2-Max</b>	30,39 $\pm$ 4,05	5,38 $\pm$ 3,70 a
<b>67:33-3x1-Usu</b>	31,71 $\pm$ 3,27	4,43 $\pm$ 3,18 a
<b>50:50-3x1-Usu</b>	26,64 $\pm$ 2,79	3,49 $\pm$ 0,42 ab
<b>50:50-3x2-Max</b>	27,22 $\pm$ 1,81	3,37 $\pm$ 1,20 ab
<b>50:50-3x2-Usu</b>	24,65 $\pm$ 5,66	0,28 $\pm$ 0,32 b
<b>67:33-3x2-Usu</b>	26,85 $\pm$ 4,48	0,20 $\pm$ 0,24 b

A concentração de nitrogênio foliar por tratamento variou de 24,65 a 31,71  $\text{g kg}^{-1}$ , porém não houve diferença estatística significativa ( $P=0,38$ ). A média destes valores (28  $\text{g kg}^{-1}$ ) foi semelhante ao valor obtido por Moraes e Domingos (1997) em uma floresta ombrófila densa no estado de São Paulo (31  $\text{g kg}^{-1}$ ). Tal constância, a despeito das práticas de adubação e controle de mato, pode ser devido à mistura de espécies, muitas das quais leguminosas (AIDAR et al., 2003; LARCHER, 2006).

O conteúdo de nitrogênio no dossel (g N por m<sup>2</sup> de solo) apresentou variação de 31,2 vezes (0,20 a 6,44 g m<sup>-2</sup>) entre os tratamentos. Como a concentração de nitrogênio não variou entre tratamentos, e a área foliar específica média foi de baixa variabilidade (10,1 ± 3,7 m<sup>2</sup>/kg), credita-se à própria diferença entre os IAFs, a diferença observada no conteúdo de nitrogênio na copa.

Assim, por exemplo, ao avaliar os dados da Tabela 24, constata-se que os conteúdos de nitrogênio no dossel dos dois últimos tratamentos com manejo usual mostraram-se baixos e estatisticamente diferentes, se comparados aos demais. Estes valores mínimos observados (0,28 e 0,20 g m<sup>-2</sup>), se devem aos também baixos valores de IAF dos mesmos tratamentos (0,20 e 0,15 m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup>, respectivamente) aos 36 meses.

Objetivando avaliar o efeito dos fatores sobre o conteúdo de nitrogênio no dossel foi elaborada a Tabela 25.

Tabela 25 – Conteúdo de nitrogênio no dossel aos 36 meses de idade (janeiro de 2007) e ganhos, por nível dos fatores. Valores seguidos de letras iguais, nos fatores, não diferiram estatisticamente pelo teste de Tukey ( $P=0,05$ ).

Fator	Níveis	Nitrogênio no dossel	Ganhos no [N]
		g m <sup>-2</sup>	%
Composição	50:50	3,28 a	-
	67:33	4,11 a	25
Espaçamento	3x1	4,86 a	92
	3x2	2,53 b	-
Manejo	Máximo	5,25 a	146
	Usual	2,13 b	-

Assim, de forma similar aos comentários da Tabela 17, o Manejo máximo e o espaçamento 3 m x 1 m, ao propiciarem maior IAF, resultaram também em maiores conteúdos de nitrogênio no dossel. Estes conteúdos, em seus valores máximos, estão dentro da faixa observada para florestas clonais de *Eucalyptus* no Brasil, entre 5 e 9 gN m<sup>-2</sup> de solo (STAPE et al., 2004b), revelando novamente o potencial de fixação de carbono por copas bem nutridas de espécies nativas em restauração.

Para verificar esta ligação, relacionou-se a produtividade primária líquida com o conteúdo de nitrogênio na copa de todos os tratamentos, conforme mostra a Figura 29.

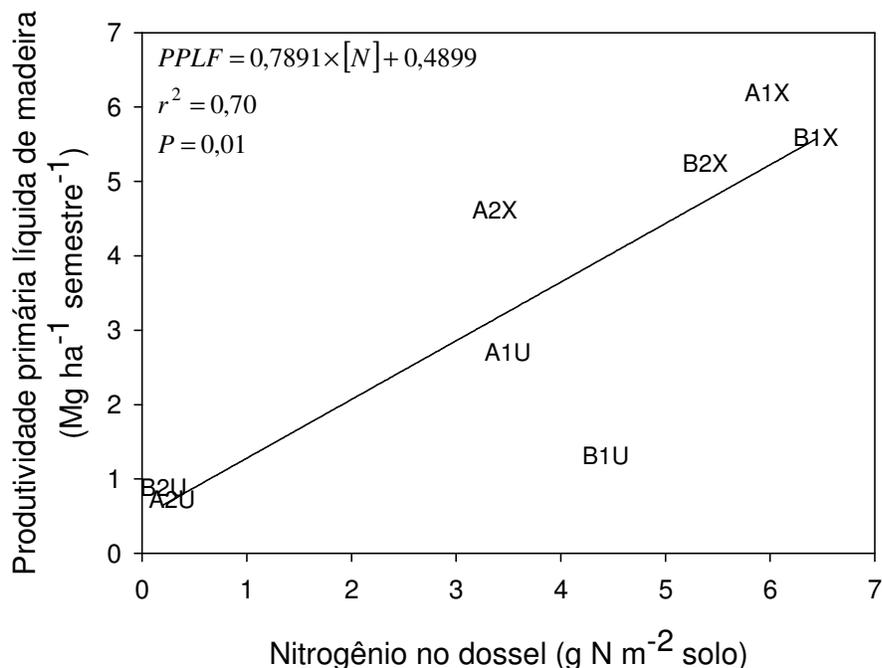


Figura 29 – Relação entre a produtividade primária líquida de madeira (PPLM) do período de julho de 2006 a janeiro de 2007 e o conteúdo de nitrogênio no dossel ([N]) em janeiro de 2007, com a regressão linear, coeficiente de determinação ( $r^2$ ) e valor de significância ( $P$ ).

A PPLM mostrou-se relacionada com o conteúdo de nitrogênio no dossel, como mostrado graficamente na Figura 29, sendo que para cada grama a mais de N no dossel (em kg de N no dossel por m<sup>2</sup> solo) observou-se um aumento de 0,79 Mg ha<sup>-1</sup> semestre<sup>-1</sup> na PPLM.

A correlação positiva entre produtividade, capacidade fotossintética e concentração de nitrogênio nas folhas, é forte e amplamente conhecida para qualquer espécie vegetal, em qualquer grupo funcional (HIKOSAKA et al., 1998; WAREN; ADAMS, 2001; CLOSE et al., 2004; STAPE et al., 2004). Isto reflete o fato de que mais da metade do nitrogênio presente nas folhas é direcionado ao aparato fotossintético, sendo que 50% concentram-se na Ribulose-1,5-bisfosfato carboxylase/oxygenase (Rubisco), a enzima mais abundante e importante da fotossíntese (EVANS, 1989). No entanto, como mostra a Figura 20, o IAF é um melhor indicador isolado da capacidade fotossintética da copa, do que o conteúdo de N do dossel.

Visto que isoladamente, tanto o IAF quanto a concentração de nitrogênio no dossel ([N]) apresentaram relação com a PPLM semestral, foi avaliada influência de ambos simultaneamente (Figura 30).

$$PPLM = 0,5103 + 1,9075 \cdot IAF + 0,3095 \cdot N \cdot IAF$$

$$r^2 = 0,99$$

$$P < 0,0001$$

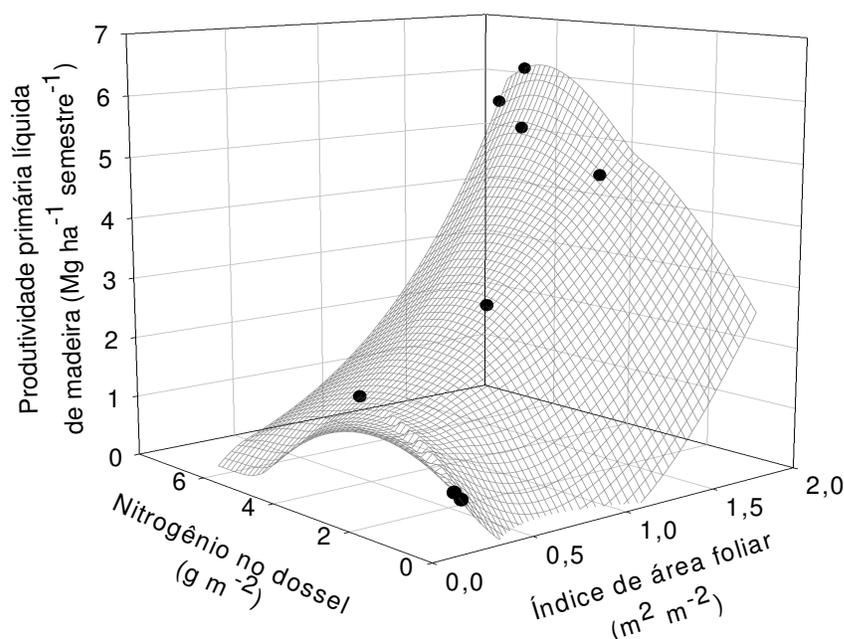


Figura 30 – Relação entre produtividade primária líquida de madeira (PPLM), índice de área foliar estimado (IAF) e conteúdo de nitrogênio no dossel (N), aos 36 meses de idade. Vê-se também a superfície de resposta, a equação, coeficiente de determinação e valor de significância (*P*).

A alta relação entre as três variáveis possui forte embasamento fisiológico, pois quanto maior é o índice de área foliar (IAF), maior é a interceptação da radiação pelo dossel, e o nitrogênio no dossel (N), afetando as taxas fotossintéticas e conseqüentemente a produtividade da floresta (PPLM) (EVANS, 1989; LANDSBERG; GOWER, 1997; DEWAR, 2003).

A superfície de resposta ajustada, Figura 30, possibilita usá-la como ferramenta de estimativa da produtividade em sistemas florestais de restauração, com as restrições às espécies e sítio estudados.

Numa última etapa de avaliação da relação entre a eficiência do uso da luz e a nutrição, testou-se a abordagem proposta por Green et al. (2003), que afirma ser a EUL uma variável governada fortemente por duas propriedades do dossel, seu total conteúdo de nitrogênio e a área foliar específica (eq.(13)). Estas duas propriedades juntas tendem a capturar muito da variação genética (espécies e grupos funcionais) e ambiental (déficit hídrico, nutrição, competição por recursos) no potencial fotossintético do dossel.

Na Figura 31 está apresentada a relação entre a EUL e o índice proposto por Green et al. (2003), simbolizado neste trabalho por  $i_N$ .

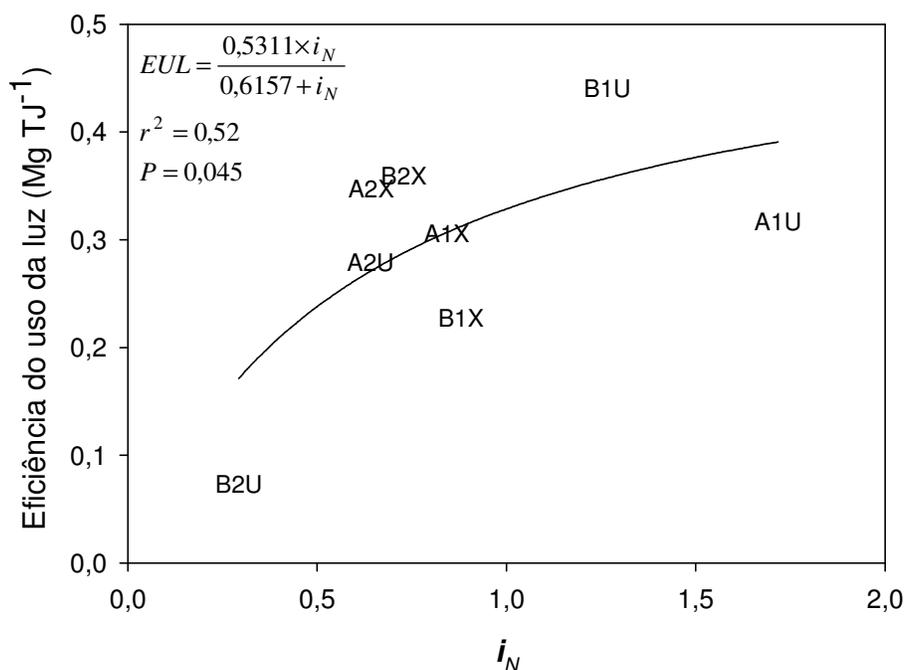


Figura 31 – Relação entre eficiência do uso da luz e o índice proposto por Green (2003), que avalia conjuntamente a concentração de nitrogênio no dossel, o índice de área foliar e a proporção da radiação fotossinteticamente ativa interceptada pelo dossel, em relação a radiação fotossinteticamente ativa incidente. A linha representa a equação ajustada, seu coeficiente de determinação e valor de significância ( $P$ ).

Nota-se pela Figura 31, que a EUL tende a crescer de forma assintótica com o  $i_N$ , e esta saturação pode ser descrita por uma relação de saturação de a *Michaelis-*

*Menten* (DEWAR, 1996; GREEN et al., 2003). Para melhor compreender esta relação, pode-se avaliar o índice rearranjando-se a eq.(13), como mostra a eq.(15) abaixo:

$$i_N = \frac{IAF \cdot [N]}{\left( \frac{RFAI}{RFA} \right)} \quad (15)$$

Onde:

$i_N$ : índice de relação nutrição e uso da luz;

IAF: índice de área foliar real ( $m^2$  folha  $m^{-2}$  solo);

[N]: concentração de nitrogênio na massa foliar (g de N  $kg^{-1}$  folhas);

RFAI: radiação fotossinteticamente ativa interceptada ( $TJ ha^{-1}semestre^{-1}$ );

RFA: radiação fotossinteticamente ativa ( $TJ ha^{-1}semestre^{-1}$ ).

Pela eq. (15) observa-se que o índice expressa basicamente o efeito do IAF e de seu estado nutricional, pois a razão (RFAI/RFA) é também dependente do IAF. Assim, a relação entre a EUL e o índice neste estudo é coerente com a maior EUL estar atrelada ao maior IAF, como é o caso do espaçamento 3 m x 2 m. Porém, o mesmo não se aplica para o espaçamento 3 m x 1 m, quando o estresse hídrico compromete a EUL, daí a menor eficácia da relação. No entanto, a persistência do estresse hídrico tende a levar à queda do IAF, o que pode vir a ser uma forma de captura do efeito do estresse hídrico neste índice. Assim, a busca de indicadores que possam estimar a EUL com base em variáveis de rápida determinação, como IAF e a nutrição, são desejáveis para melhorar a estimativa da produtividade de florestas naturais (CLARK et al., 2001a; 2001b).

## 5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos até os 42 meses de idade do experimento de restauração florestal em área de pastagem degradada, onde se estudou variáveis dendrométricas e ecofisiológicas de 20 espécies nativas de Mata Atlântica, em tratamentos com diferentes níveis de composição florística (50:50% e 67:33% de espécies pioneiras e não pioneiras), espaçamentos de plantio (3m x 1m e 3m x 2m) e manejo de silvicultural (Usual, com maior estresse ambiental, e Máximo, com minimização do estresse ambiental), pode-se concluir que:

- Em relação ao fator Composição, a proporção de 50% ou 67% de pioneiras foram estatisticamente equivalentes, em todas as idades, no que se refere à produtividade primária líquida de madeira (PPLM), o índice de área foliar (IAF), e a eficiência do uso da luz (EUL). Desta forma, a proporção de 50% de pioneiras mostra-se como a mais indicada por aumentar a frequência de plantio das espécies mais longevas (secundárias tardias e climácicas) sem afetar a produtividade;
- Em relação ao fator Espaçamento, o plantio mais adensado, 3m x 1m (3.333 árvores ha<sup>-1</sup>) propiciou um maior estoque de biomassa aos 42 meses, comparativamente ao espaçamento 3m x 2m (1.667 árvores/ha) (13,0 Mg ha<sup>-1</sup> *versus* 10,3 Mg ha<sup>-1</sup>), devido às suas maiores produtividades até os 24 meses. Porém, as produtividades primárias líquidas de madeira de ambos os espaçamentos não se diferiram mais significativamente a partir dos 36 meses (5,5 Mg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>). Tais resultados indicam que o espaçamento 3m x 2m é o mais indicado operacionalmente para fins de restauração, face a sua ocupação do sítio em idade precoce, e com menor custo de implantação;
- A maior produtividade do espaçamento 3m x 1m foi diretamente relacionado ao seu maior índice de área foliar entre os 36 e 42 meses, comparativamente ao espaçamento 3m x 2m (0,97 m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup> *versus* 0,71 m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup>), resultando em significativa interação Espaçamento x Manejo;

- Em relação ao fator Manejo, o manejo máximo proporcionou um aumento de 4 vezes na biomassa de madeira aos 42 meses, comparativamente ao manejo usual ( $18,6 \text{ Mg ha}^{-1}$  *versus*  $4,6 \text{ Mg ha}^{-1}$ ). Este maior estoque é explicado pelos maiores índices de área foliar ( $1,34 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$  *versus*  $0,34 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ ), levando a consistentes maiores produtividades primárias de madeira ( $8,5 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  *versus*  $2,4 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ , aos 42 meses). Desta forma, a realização do manejo máximo, com controle das gramíneas e fertilização, se mostra fundamental para o rápido fechamento das copas e aumento da produtividade, tornando o processo de restauração mais eficaz e com menores riscos de insucesso;

- A interação Espaçamento x Manejo foi significativa para as três variáveis de estudo: índice de área foliar (IAF), eficiência do uso da luz (EUL) e produtividade primária líquida de madeira (PPLM), mostrando que as respostas dos espaçamentos 3m x 1m e 3m x 2m à aliviação do estresse ambiental são distintas. Assim, o espaçamento 3m x 2m é altamente dependente do manejo máximo para potencializar sua expressão de IAF ( $1,71 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ ), EUL ( $0,27 \text{ Mg TJ}^{-1}$ ) e conseqüentemente da PPLM ( $8,6 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ), face à intensa concorrência por gramíneas no manejo usual. Já para o espaçamento 3m x 1m, a melhoria por aliviação do estresse ambiental, apesar de ocorrer com aumento do IAF, é parcialmente limitada pela maior concorrência entre os indivíduos ( $3.333 \text{ árvores/ha}$ ), que resulta em menor EUL devido ao déficit hídrico dos indivíduos, e tendo menor impacto na PPLM;

- A produtividade primária líquida de madeira mostrou-se altamente relacionada com o índice de área foliar na época de verão, aos 36 meses de idade ( $\text{PPLM} = 3,1264 \cdot \text{IAF} - 0,0044$ ,  $r^2=0,96$ ), sendo que a incorporação do conteúdo de nitrogênio no dossel elevou ainda mais tal relação ( $\text{PPLM} = 0,5103 + 1,9075 \cdot \text{IAF} + 0,3095 \cdot \text{N} \cdot \text{IAF}$ ,  $r^2=0,99$ ), evidenciando o alto potencial de utilização destas duas variáveis como diagnóstico da qualidade e produtividade de florestas de restauração.

Assim, retomando as hipóteses iniciais do estudo, verifica-se que:

- I. A composição florística com maior proporção de espécies pioneiras influenciará positivamente a PPLM, IAF e EUL face às suas características intrínsecas de crescimento acelerado: **Rejeitada para as proporções estudadas.**
- II. O espaçamento de plantio mais adensado elevará a PPLM e IAF, porém com a mesma EUL: **Corroborada até a ocupação do sítio pelo espaçamento menos denso;**
- III. As práticas silviculturais intensivas elevarão a PPLM, o IAF, o estado nutricional e a EUL, sendo o ganho em EUL superior ao ganho em IAF: **Corroborada em sua quase totalidade, exceto para a EUL no Espaçamento 3m x 1m;**
- IV. A PPLM será proporcional ao IAF e seu estado fisiológico (nutricional e hídrico): **Corroborada.**

## REFERÊNCIAS

AHL, D.E.; GOWER, S.T.; MACKAY, D.S.; BURROWS, S.N.; NORMAN, J.M.; DIAK, G.R. Heterogeneity of light use efficiency in northern Wisconsin forest: implications for modeling net primary production with remote sensing. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 93, p. 168-178, 2004.

AIDAR, M.P.M.; SCHMIDT, S.; MOSS, G.; STEWART, G.R.; JOLY, C.A. Nitrogen use strategies of neotropical rainforest trees in threatened Atlantic Forest. **Plant, Cell and Environment**, Oxford, v. 26, p. 389-399, 2003.

ASNER, G.P.; WESSMAN, C.A. Scaling PAR absorption from leaf to landscape level in spatially heterogeneous ecosystems. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 103, p. 81-97, 1997.

ASSUNÇÃO, C.T.; LEITÃO FILHO, H.F.; CESAR, O. Descrição das matas da Fazenda Barreiro Rico, Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Botânica**, São Paulo, v. 5, n. 1/2, p. 53-66, dez. 1982.

BASSET, Y.; HORLYCK, V.; WRIGHT, S.J. **Studying forest canopies from above: The International Canopy Crane Network**. Panama: Smithsonian Tropical Research Institute; UNEP, 2003. 196 p.

BEADLE, C.L. Dynamics of leaf and canopy development. In: NAMBIAR, E.K.S.; BROWN, A. (Ed.). **Management of soil, nutrients and water in tropical plantation forests**. Canberra: ACIAR; CSIRO; CIFOR, 1997. chap. 6, p. 169-212.

BINKLEY, D.; STAPE, J.L.; RYAN, M.G. Thinking about efficiency of resource use in forests. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 193, p. 5-16, 2004.

BOTELHO, S.A.; DAVIDE, A.C.; FARIA, J.M.R. Desenvolvimento inicial de seis espécies florestais nativas em dois sítios, na região Sul de Minas Gerais. **Cerne**, Lavras, v. 2, n. 1, p. 36-46, 1996.

BRÉDA, N.J.J. Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 54, n. 392, p. 2043-2417, Nov. 2003.

BROWN, S.; LUGO, A. Rehabilitation of tropical lands: a key of sustaining development. **Restoration Ecology**, Oxford, v. 2, p. 97-111, 1994.

BURROWS, S.N.; GOWER, S.T.; NORMAN, J.M.; DIAK, G.; MACKAY, D.S.; AHL, D.E.; CLAYTON, M.K. Spatial variability of aboveground net primary production for a forested landscape in northern Wisconsin. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 33, p. 2007-2018, 2003.

CAMPBELL, G.S.; NORMAN, J.M. The description and measurement of plant canopy structure. In: RUSSELL, G.; MARSHALL, B.; JARVIS, P. (Ed.). **Plant canopies: their growth, form and function**. Cambridge: Cambridge University Press, 1989. chap. 1, p. 1-19.

CAN-EYE manual. Disponível em: <[http://www.avignon.inra.fr/can\\_eye/page5.php](http://www.avignon.inra.fr/can_eye/page5.php)>. Acesso em: 05 set. 2006.

CANNELL, M.G.R. Light interception, light use efficiency and assimilate partitioning in poplar and willow stands. In: PEREIRA, J.S.; LANDSBERG, J.J. (Ed.). **Biomass production by fast-growing trees**. Dordrecht: Kluwer Academic, 1989. p. 1-12.

CARVALHO, P.E. **Espécies florestais brasileiras recomendadas para silvicultura: potencialidades e uso da madeira**. Colombo: EMBRAPA, 1994. 639 p.

CESAR, O. **Composição florística, fitossociologia e ciclagem de nutrientes em mata mesófila semidecídua (Fazenda Barreiro Rico, Município de Anhembi, SP)**. 1988. 223 p. Tese (Livre-Docência) – Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, Rio Claro, 1988.

CHAZDON, R.L.; PEARCY, R.W.; LEE, D.W.; FETCHER, N. Photosynthetic responses of tropical forest to contrasting light environments. In: MULKEY, S.S.; CHAZDON, R.L.; SMITH, A.P. **Tropical forest plant ecophysiology**. New York: Chapman & Hall, 1996. chap. 1, p. 1-55.

CHEN, J.M.; BLACK, T.A. Foliage area and canopy architecture of plant canopies from sunfleck size distributions. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 60, p. 249-266, 1992.

CHEN, J.M.; CIHLAR, J. Quantifying the effect of canopy architecture on optical measurements of leaf area index using two gap size analysis methods. **Transactions on Geoscience and remote sensing**, Piscataway, v. 33, n. 3, p. 777-787, May 1995.

CHEN, J.M.; RICH, P.M.; GOWER, S.T.; NORMAN, J.M.; PLUMMER, S. Leaf area index of boreal forests: Theory, techniques, and measurements. **Journal of Geophysical Research**, Washington, v. 102, n. D24, p. 429-443, 1997.

CLARK, D.A.; BROWN, S.; KICKLIGHTER, D.W.; CHAMBERS, J.Q.; THOMLINSON, J.R.; NI, J. Measuring net primary production in forests: concepts and field methods. **Ecological Applications**, Washington, v. 11, n. 2, p.356-370, 2001b.

CLARK, D.A.; BROWN, S.; KICKLIGHTER, D.W.; CHAMBERS, J.Q.; THOMLINSON, J.R.; NI, J.; HOLLAND, E.A. Net primary production in tropical forests: an evaluation and synthesis of existing field data. **Ecological Applications**, Washington, v. 11, n. 2, p.371-384, 2001a.

CLARK, D.B.; OLIVAS, P.C.; OBERBAUER, S.F.; CLARK, D.A.; RYAN, M.G. First direct landscape-scale measurement of tropical rain forest Leaf Area Index, a key driver of global primary productivity. **Ecology Letters**, Oxford, v. 11, p. 163-172, 2008.

CLOSE, D.C. Within-canopy gradients of nitrogen and photosynthetic activity of *Eucalyptus nitens* and *Eucalyptus globulus* in response to nitrogen nutrition. **Australian Journal of Botany**, Melbourne, v. 52, p. 133-140, 2004.

CRAMER, W.; KICKLIGHTER, D.W.; BONDEAU, A.; MOORE III, B.; CHURKIN, G. NEMRY, B.; RUIMY, A.; SCHLOSS, A.L. Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): overview and key results. **Global Change Biology**. Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP), Oxford, v. 5, suppl. 1, p. 1-15, 1999.

DEWAR, R.C. The correlation between plant growth and intercepted radiation: an interpretation in terms of optimal plant nitrogen content. **Annals of Botany**, Oxford, v. 78, p. 125-136, 1996.

DURIGAN, G.; FIGLIOLIA, M.B.; KAWABATA, M.; GARRIDO, M.A.O.; BAITELLO, O. **Sementes e mudas de árvores tropicais**. São Paulo: Instituto Florestal, 2002. 65 p.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: Embrapa Produção de Informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 412 p.

ENGEL, V.L.; PARROTA, J.A. An evaluation of direct seeding for reforestation of degraded lands in central São Paulo state, Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 152, p. 169-181, 2001.

\_\_\_\_\_. Definindo restauração ecológica: tendências perspectivas mundiais. In: KAGEYAMA, P.Y.; OLIVERA, R.E.; MORAES, L.F.D.; ENGEL, V.L.; GANDARA, F.B. (Ed.). **Restauração ecológica de ecossistemas naturais**. Botucatu: FEPAF, 2003. cap. 1, p. 3-26.

EVANS, J.R. Photosynthesis and nitrogen relationships in leaves of C3 plants. **Oecologia**, Berlin, v. 78, p. 9-19, 1989.

FAO. **State of the world's forests 2007**. Rome, 2007. 144 p.

FASSNACHT, K.S.; GOWER, S.T.; NORMAN, J.M.; McMURTRIE, R.E. A comparison of optical and direct methods for estimating foliage surface area index in forests. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 71, p. 183-207, 1994.

FIELD, C.B. Ecological scaling of carbon gain to stress and resource availability. In: MOONEY, H. (Ed.). **Response of plants to multiple stresses**. San Diego: Academic Press, 1991. p. 35-65.

FINEGAN, B. Pattern and processes in Neotropical secondary rain forests: the first 100 years of succession. **Trends in Ecology and Evolution**, Cambridge, v. 11, n. 3, p. 119-124, 1996.

FOELKEL, C.E.B.; BRASIL, M.A.M.; BARRICHELO, L.E.G. Métodos para determinação de densidade básica de cavacos para coníferas e folhosas. **IPEF**, Piracicaba, n. 2/3, p. 65-74, 1971.

FRAZER, G.W.; FOURNIER, R.A.; TROFYMOW, J.A.; HALL, R.J. Comparison of digital and film fisheye photography for analysis of forest canopy structure and gap light transmission. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 109, p. 249-263, 2001.

FRAZER, G.W.; CANHAM, C.D.; LERTZMAN, K.P. **Gap light analyzer**: version 2.0: Imaging software to extract canopy structure and gap light transmission indices from true-colour fisheye photographs. Disponível em: <[http://www.rem.sfu.ca/forestry/downloads/gap\\_light\\_analyzer.htm](http://www.rem.sfu.ca/forestry/downloads/gap_light_analyzer.htm)>. Acesso em: 15 ago. 2007.

FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA. **Dossiê mata atlântica**. São Paulo, 1992. 119 p.

FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA; INSTITUTO DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Atlas da evolução de remanescentes florestais e ecossistemas associados do domínio da Mata Atlântica no período de 1985 a 1990**. São Paulo, 1993. 22 p.

GALINDO-LEAL, C.; CÂMARA, I.G. **Mata atlântica**: biodiversidade, ameaças e perspectivas. São Paulo: Fundação SOS Mata Atlântica, 2005. 472 p.

GONÇALVES, J.L.M.; STAPE, J.L.; BENEDETTI, V.; FESSEL, V.A.G.; GAVA, J.L. Reflexos do cultivo mínimo e intensivo do solo em sua fertilização e na nutrição das árvores. In: GONÇALVES, J.L.M.; BENEDETTI, V. (Ed.). **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba: IPEF, 2000. cap. 1, p. 1-58.

GONÇALVES, J.L.M.; STAPE, J.L.; LACLAU, J.P.; BOUILLET, J.P.; RANGER, J. Assessing the effects of early silvicultural management on long-term site productivity of fast growing eucalypt plantations: The Brazilian experience. In: EUCALYPTUS AND DIVERSITY: BALANCING PRODUCTIVITY AND SUSTAINABILITY, 2007, Durban. **Annals...** Durban: IUFRO, 2007. p. 37.

GOWER, S.T.; KUCHARIK, C.J.; NORMAN, J.M. Direct and indirect estimation of leaf area index, fAPAR and net primary production of terrestrial ecosystems. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 70, p. 29-51, 1999.

GOWER, S.T.; KRANKINA, O.; OLSN, R.J.; APPS, M.; LINDER, S.; WANG, C. Net primary production and carbon allocation patterns of boreal forest ecosystems. **Ecological Applications**, Washington, v. 11, n. 5, p. 1395-1411, 2001.

GREEN, D.S.; ERICKSON, J.E.; KRUGER, E.L. Foliar morphology and canopy nitrogen as predictors of light-use efficiency in terrestrial vegetation. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 115, p. 163-171, 2003.

HAXELTINE, A.; PRENTICE, I.C. A general model for light-use efficiency of primary production. **Functional Ecology**, Oxford, v. 10, p. 551-561, 1996.

HEDMAN, C.W.; BINKLEY, D. Canopy profiles of some Piedmont hardwood forests. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 18, p. 1090-1093, 1988.

HENSKENS, F.L.; BATTAGLIA, M.; CHERRY, M.L.; BEADLE, C.L. Physiological basis of spacing effects on tree growth and form in *Eucalyptus globulus*. **Trees**, Berlin, v. 15, p. 365-377, 2001.

HIKOSAKA, K.; HANBA, Y.T.; HIROSE, T.; TERASHIMA, I. Photosynthetic nitrogen-use efficiency in leaves of Woody and herbaceous species. **Functional Ecology**, Oxford, v. 12, p. 896-905, 1998.

HOLBROOK, N.M.; LUND, C.P. Photosynthesis in forest canopies. In: LOWMAN, M.D.; NADKARNI, N.M. (Ed.). **Forest canopies**. San Diego: Academic Press, 1995. chap. 17, p. 411-430.

HYER, E.J.; GOETZ, S.J. Comparison and sensitivity analysis of instruments and radiometric methods for LAI estimation: assessments from a boreal forest site. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 122, p. 157-174, 2004.

IANNELLI – SERVIN, C. M. **Caracterização ecofisiológica de espécies nativas da Mata Atlântica sob dois níveis de estresse induzidos pelo manejo florestal em área de restauração florestal no Estado de São Paulo**. 2007. 94 p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

INSTITUTO SOCIOAMBIENTAL. **Dossiê mata atlântica**: projeto monitoramento participativo da Mata Atlântica. São Paulo, 2001. 407 p.

INTERNATIONAL TROPICAL TIMBER ORGANIZATION. **Guidelines for the restoration, management and rehabilitation of degraded and secondary tropical forests**. Yokohama, 2002. 84 p.

JONCKHEERE, I.; FLECK, S.; NACKAERTS, K.; MUYS, B.; COPPIN, P.; WEISS, M.; BARET, F. Review of methods in situ leaf area index determination. Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 121, p. 19-35, 2004.

KAGEYAMA, P.Y.; CASTRO, C.F.A. Sucessão secundária, estrutura genética e plantações florestais de espécies arbóreas nativas. **IPEF**, Piracicaba, n.41/42, p. 83-93, 1989.

KAGEYAMA, P.Y.; OLIVERA, R.E.; MORAES, L.F.D.; ENGEL, V.L.; GANDARA, F.B. **Restauração ecológica de ecossistemas naturais**. Botucatu: FEPAF, 2003. 340 p.

KAGEYAMA, P.Y.; GANDARA, F.B.; OLIVEIRA, R.E. Biodiversidade e restauração da floresta tropical. In: KAGEYAMA, P.Y.; OLIVERA, R.E.; MORAES, L.F.D.; ENGEL, V.L.; GANDARA, F.B. (Ed.). **Restauração ecológica de ecossistemas naturais**. Botucatu: FEPAF, 2003. cap. 2, p. 29-48.

KITAJIMA, K.; MULKEY, S.S.; WRIGHT, S.J. Variation in crown light utilization characteristics among tropical canopy trees. **Annals of Botany**, Oxford, v. 95, p. 535-547, 2005.

LAMB, D. Large-scale ecological restoration of degraded tropical forest lands: the potential role of timber plantations. **Restoration Ecology**, Oxford, v. 6, n. 3, p. 271-279, Sept. 1998.

LAMB, D.; TOMLINSON, M. Forest rehabilitation in the Asia-Pacific region: past lessons and present uncertainties. **Journal of Tropical Forest Science**, Kepong, v. 7, n. 1, p. 157-170, 1994.

LAMB, D.; ERSKINE, P.D.; PARROTTA, J. A. Restoration of degraded tropical forest landscapes. **Science**, Washington, v. 310, p. 1628-1632, Dec. 2005.

LANDSBERG, J.J. **Physiological ecology of forest production**. London: Academic Press, 1986. 198 p.

\_\_\_\_\_. Physiology in forest models: history and the future. **Forest Biometry, Modelling and Information Sciences**, London, v. 1, p. 49-63, 2003.

LANDSBERG, J.J.; GOWER, S.T. **Applications of physiological ecology to forest management**. San Diego: Academic Press, 1997. 354 p.

LANDSBERG, J.J.; WARING, R.H. A generalized model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 95, p. 209-228, 1997.

LARCHER, W. **Physiological plant ecology: ecophysiology and stress physiology of functional groups**. 3<sup>rd</sup> ed. New York: Springer Verlag, 1995. 506 p.

\_\_\_\_\_. **Ecofisiologia vegetal**. São Carlos: RiMa, 2006. 550 p.

LANG, A.R.G. Simplified estimate of leaf area index from transmittance of the sun's beam. **Agricultural Forest and Meteorology**, Amsterdam, v. 41, n. 3/4, p. 179-186, 1987.

LANG, A.R.G.; XIANG, Y. Estimation of leaf area index from transmission of direct sunlight in discontinuous canopies. **Agricultural Forest and Meteorology**, Amsterdam, v. 37, n. 3, p. 229-243, 1986.

LITTON, C.M.; SANDQUIST, D.R.; CORDELL, S. Effects of non-native grass invasion on aboveground pools and tree population structure in a tropical dry forest of Hawaii. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 231, p. 105-113, 2006.

LORENZI, H. **Árvores brasileiras**. Nova Odessa: Plantarum, 1992. 352 p.

LOWMAN, M.D.; NADKARNI, N.M. **Forest canopies**. San Diego: Academic Press, 1995. 624 p.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. Piracicaba: Potafos, 1989. 211 p.

MALHI, Y.; GRACE, J. Tropical forests and atmospheric carbon dioxide. **Trends in Ecology and Evolution**, Berlin, v. 15, n. 8, p. 332-337, Aug. 2000.

MANTOVANI, W. A degradação dos biomas brasileiros. In: RIBEIRO, W. C. (Ed.). **Patrimônio ambiental brasileiro**. São Paulo: EDUSP, 2003. p. 367-439.

MELO, A.C.G.; DURIGAN, G. Fixação de carbono em reflorestamentos de matas ciliares no Vale do Paranapanema, SP, Brasil. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n.71, p. 149-154, ago. 2006.

\_\_\_\_\_. Evolução estrutural de reflorestamentos de restauração de matas ciliares no Médio Vale do Paranapanema. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n.73, p. 101-111, mar. 2007.

MILLER, J.B. A formula for average foliage density. **Australian Journal of Botany**, Melbourne, v.15, p. 141-144, 1967.

MITTERMEIER, R.A.; MYERS, N.; GIL, P.R.; MITTERMEIER, C.G. **Hotspots**: earth's biologically richest and most endangered terrestrial ecoregions. Monterrey: Conservation International; CEMEX, 1999. 431 p.

MONTEITH, J.L. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. **Journal of Applied Ecology**, Oxford, v. 9, n. 3, p. 747-766, Dec. 1972.

\_\_\_\_\_. **Principles of environmental physics**. New York: Elsevier, 1975. 241 p.

\_\_\_\_\_. Climate and the efficiency of crop production in Britain. **Philosophical Transactions of the Royal Society**. Series B, Biological Science, London, v. 281, p. 277-294, 1977.

MORAES, R.M.; DOMINGOS, M. Elementos minerais em folhas de espécies arbóreas de Mata Atlântica e Mata de Restinga, na Ilha do Cardoso, SP. **Revista Brasileira de Botânica**, São Paulo, v. 20, n. 2, p. 133-138, 1997.

NAMBIAR, S.E.K. Interplay between nutrients, water, root growth and productivity in young plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 30, p. 213-232, 1990.

NAMBIAR, S.E.K.; BROWN, A.G. **Management of soil nutrients and water in tropical plantations forests**. Canberra: CSIRO; ACIAR, 1997. 571 p. (CSIRO/ACIAR Monograph, 43).

NOBIS, M.; HUNZIKER, U. Automatic thresholding for hemispherical canopy-photographs based on edge detection. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 128, p. 243-250, 2005.

NORMAN, J.M.; CAMPBELL, G.S. Canopy structure. In: PEARCY, R.W.; EHLERINGER, J.R.; MOONEY, H.; RUNDEL, P.W. (Ed.). **Plant physiological ecology: field methods and instrumentation**. London: Chapman and Hall, 1992. chap. 14, p. 301-326.

\_\_\_\_\_. **An introduction to environmental biophysics**. 2<sup>nd</sup> ed. New York: Springer Verlag, 1997. 286 p.

NORMAN, J.M.; JARVIS, P.G. Photosynthesis in Sitka spruce (*Picea sitchensis* (Bong.) Carr.). IV. Radiation penetration theory and a test case. **Journal of Applied Ecology**, Oxford, v. 12, p. 839-878, 1975.

OLIVEIRA-FILHO A.T.; FONTES, M.A.L. The Brazilian atlantic forest. **Biotropica**. Patterns of Floristic Differentiation among Atlantic Forests in Southeastern Brazil and the Influence of Climate, Washington, v. 32, suppl. 4b, p. 793-810, 2000.

PARROTTA, J.A. The role of plantations forests in rehabilitating degraded ecosystems. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 41, p. 115-133, 1992.

PARROTTA, J.A.; KNOWLES, O.H. Restauração florestal em áreas de mineração de bauxita na Amazônia. In: KAGEYAMA, P.Y.; OLIVERA, R.E.; MORAES, L.F.D.; ENGEL, V.L.; GANDARA, F.B. (Ed.). **Restauração ecológica de ecossistemas naturais**. Botucatu: FEPAF, 2003. cap. 14, p. 307-330.

PARROTTA, J.A.; TURNBULL, J.W.; JONES, N. Catalyzing native forest regeneration on degraded tropical lands. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 99, p. 1-7, 1997.

PASTOR, J.; BRIDGHAM, S.D. Nutrient efficiency along nutrient availability gradients. **Oecologia**, Berlin, v.118. p. 50-58, 1999.

REIS, A.; KAGEYAMA, P.Y. Restauração de áreas degradadas utilizando interações interespecíficas. In: KAGEYAMA, P.Y.; KAGEYAMA, P.Y.; OLIVERA, R.E.; MORAES, L.F.D.; ENGEL, V.L.; GANDARA, F.B. (Ed.). **Restauração ecológica de ecossistemas naturais**. Botucatu: FEPAF, 2003. cap. 5, p. 91-110.

REUNIÃO DE CLASSIFICAÇÃO, CORRELAÇÃO DE SOLO E INTERPRETAÇÃO DE APTIDÃO AGRÍCOLA, 3., Rio de Janeiro, 1988. **Anais...** Rio de Janeiro: Embrapa Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1988. 425 p.

RODRIGUES, R.R.; GANDOLFI, S. Conceitos, tendências e ações para a recuperação de florestas ciliares. In: RODRIGUES, R.R.; LEITÃO-FILHO, H.F. (Ed.). **Mata ciliares: conservação e recuperação**. São Paulo: EDUSP; FAPESP, 2000. cap. 15.1, p. 235-248.

RODRIGUES, R.R.; LEITÃO-FILHO, H.F. **Matas ciliares: conservação e recuperação**. São Paulo: EDUSP; FAPESP, 2000. 320 p.

ROLIM, G.S.; SENTELHAS, P.C.; BARBIERI, V. Planilhas no ambiente EXCEL™ para os cálculos de balanços hídricos: normal, seqüencial, de cultura e de produtividade real e potencial. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 6, n. 1, p. 133-137, 1998.

RONDON, E.V. Produção de biomassa e crescimento de árvores de *Schizolobium amazonicum* (Huber) Duke sob diferentes espaçamentos na Região da Mata. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 26, n. 5, p. 573-576, 2002.

ROSS, J. **The radiation regime and architecture of plant stands**. London: Junk, 1981. 391 p.

RUNYON, J.; WARING, R.H.; GOWARD, S.N.; WELLES, J.M. Environmental limits on net primary production and light-use efficiency across the Oregon Transect. **Ecological Applications**, Washington, v. 4, n. 2, p. 226-237, 1994.

RYAN, M.G. Effects of climate change on plant respiration. **Ecological Applications**, Washington, v. 1, n. 2, p. 157-167, 1991.

SALDARRIAGA, J.G.; LUXMOORE, R.J. Solar energy conversion efficiencies during succession of a tropical rain forest in Amazonia. **Journal of Tropical Ecology**, Cambridge, v. 7, p. 233-242, 1991.

SANDS, P.J.; LANDSBERG, J.J. Parameterization of 3-PG for plantation grown *Eucalyptus globulus*. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 163, p. 273-292, 2002.

SCHLEPPI, P.; CONEDERA, M.; SEDIVY, I.; THIMONIER, A. Correcting non-linearity and slope effects in the estimation of the leaf area index of forests from hemispherical photographs. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 144, p. 236-242, 2007.

SCOLFORO, J.R.S.; FIGUEIREDO FILHO, A. **Biometria Florestal: medição e volumetria de árvores**. Lavras: UFLA, FAEPE, 1998. 310 p.

SINCLAIR, T.R.; MUCHOW, R.C. Radiation use efficiency. **Advances in Agronomy**, New York, v. 65, p. 215-265, 1999.

STAPE, J.L. **Production ecology of clonal Eucalyptus plantations in northeastern Brazil**. 2002. 225 p. Thesis (Ph.D. in Forest Sciences) – Colorado State University, Fort Collins, 2002.

STAPE, J.L.; BINKLEY, D.; RYAN, M.G. Slash-burning and fertilization strongly affect canopy development and the developmental stages of Eucalyptus clonal plantations. In: EUCPROD MEETING, 1., Hobart, 2002. **Annals...** Hobart: CSIRO, 2002. p. 2.

\_\_\_\_\_. Eucalyptus production and supply, use and efficiency of the use of water, light and nitrogen across a geographic gradient in Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 193, p. 17-31, 2004a.

\_\_\_\_\_. Testing the utility of the 3-PG model for growth of *Eucalyptus grandis* x *urophylla* with natural and manipulated supplies of water and nutrients. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 193, p. 219-234, 2004b.

\_\_\_\_\_. Production and carbon allocation in a clonal *Eucalyptus* plantation with water and nutrient manipulations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 255, p. 920-930, 2008.

STAPE, J.L.; GANDARA, F.B.; SANTOS, J.D.; GUSSON, E.; MENDES, J.C.T. **Modelos de recuperação de áreas degradadas da Mata Atlântica com espécies nativas em duas regiões do Brasil visando seqüestro de carbono**. Piracicaba: IPEF; ESALQ, Depto. Ciências Florestais, 2006. 164 p. Relatório Final do Projeto Petrobrás – IPEF.

TABARELLI, M.; PINTO, L.P.; SILVA, J.M.C.; HIROTA, M.; BEDÊ, L. Challenges and opportunities for biodiversity conservation in the Brazilian Atlantic forest. **Conservation Biology**, Cambridge, v. 19, n. 3, p. 695-700, June 2005.

THOMPSON, J.; PROCTOR, J.; VIANA, V.; MILLIKEN, W.; RATTER, J.A.; SCOTT, D.A. Ecological studies on a lowland evergreen rain forest on Maracá Island, Roraima, Brazil. I. Physical environment, forest structure and leaf chemistry. **Journal of Ecology**, Oxford, v. 80, p. 689-703, 1992.

TOLEDO, P.E.N.; MATTOS, Z.P.B. Aspectos econômicos da questão de restauração de áreas degradadas. In: KAGEYAMA, P.Y.; KAGEYAMA, P.Y.; OLIVERA, R.E.; MORAES, L.F.D.; ENGEL, V.L.; GANDARA, F.B. (Ed.). **Restauração ecológica de ecossistemas naturais**. Botucatu: FEPAF, 2003. cap. 9, p. 205-238.

TOLEDO, R.E.B.; ALVES, P.L.C.A.; VALLE, C.F.; ALVARENGA, S.F. Manejo de *Brachiaria decumbens* e seu reflexo no desenvolvimento de *Eucalyptus gradis*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 55, p. 129-141, jun. 1999.

TOLEDO, R.E.B.; VICTORIA FILHO, R.; ALVES, P.L.C.A.; PITELLI, R.A.; LOPES, M.A.F. Faixas de controle de plantas daninhas e seus reflexos no crescimento de plantas de eucalito. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 64, p. 78-92, dez. 2003.

VITOUSEK, P. Nutrient cycling and nutrient use efficiency. **The American Naturalist**, Chicago, v. 119, n. 4, p. 553-572, Apr. 1982.

WALTER, J.M.N.; TORQUEBIAU, E. The computation of forest leaf area index on slope using fish-eye sensors. **Comptes Rendus de l'Académie des Sciences**, Paris, v. 323, n. 9, p. 801-813, Sept. 2000.

WANG, Y.P.; JARVIS, P.G. Description and validation of an array model – MAESTRO. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 5, p. 257-280, 1990.

WARREN, C.R.; ADAMS, M.A. Distribution of N, Rubisco and photosynthesis in *Pinus pinaster* and acclimation to light. **Plant, Cell and Environment**, Oxford, v. 24, p. 597-609, 2001.

WATSON, D.J. Comparative physiological studies in the 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, p. 41-76, 1947.

WIRTH, R.; WEBER, B.; RYEL, R.J. Spatial and temporal variability of canopy structure in a tropical moist forest. **Acta Oecologica**, Paris, v. 22, p. 235-244, 2001.

ZHANG, Y.; CHEN, J.M.; MILLER, J.R. Determining digital hemispherical photograph exposure for leaf area index estimation. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 133, p. 166-181, 2005.