

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

Desenvolvimento de raiz fina em povoamentos monoespecíficos e mistos de *Eucalyptus grandis* e *Acacia mangium*

Eduardo Vinícius da Silva

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

**Piracicaba
2007**

Eduardo Vinícius da Silva
Engenheiro Florestal

Desenvolvimento de raiz fina em povoamentos monoespecíficos e mistos de
Eucalyptus grandis e *Acacia mangium*

Orientador:
Prof. Dr. **JOSÉ LEONARDO DE MORAES GONÇALVES**

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

Piracicaba
2007

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

Silva, Eduardo Vinícius da
Desenvolvimento da raiz fina em povoamentos monoespecíficos e mistos de
Eucalyptus grandis e *Acácia mangium* / Eduardo Vinícius da Silva. - - Piracicaba, 2007.
54 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2007.
Bibliografia.

1. Acácia 2. Adubação 3. Eucalipto 4. Fixação de nitrogênio 5. Nodulação 6. Sistema
radicular I. Título

CDD 634.9734

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

A Deus

Aos meus pais Ernesto e Augusta

Aos meus irmãos André e Juliana

A Ana Paula Ferreira

***pelo amor
e
respeito que tenho por eles***

Dedico

AGRADECIMENTOS

Os momentos vividos nesta jornada de trabalho e estudos foram para mim, com certeza, os mais gratificantes, pois chegando ao final é visto a superação de problemas e principalmente o engrandecimento pessoal adquirido. Ser mestre, é para mim, a realização de um sonho, que com muita luta e suor valoriza ainda mais esta conquista e me dá forças para chegar ainda mais longe.

A Deus pela força e coragem na superação dos obstáculos.

A Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, em particular ao Departamento de Ciências Florestais, pela oportunidade concedida para o aprimoramento de meus conhecimentos e engrandecimento profissional.

Ao Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais (IPEF), pelo auxílio financeiro concedido através de bolsa de estudo.

Ao CIRAD - Forêt, pela disponibilização de recursos para a aquisição de equipamentos e apoio logístico durante a execução dos trabalhos de campo.

Ao Prof. Dr. José Leonardo de Moraes Gonçalves pela valorosa orientação e amizade.

Aos pesquisadores Jean Paul Laclau, Christophe Jourdan e Jean Pierre Bouillet, pelas sugestões e críticas feitas a este trabalho.

Ao Rildo Moreira e ao João Carlos coordenadores da Estação Experimental de Ciência Florestal de Itatinga, vinculada ao Departamento de Ciências Florestais – ESALQ/USP.

Para encerrar, agradeço a todas as pessoas que direta o indiretamente colaboraram na realização deste trabalho.

SUMÁRIO

RESUMO	6
ABSTRACT.....	7
1 INTRODUÇÃO	8
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	18
3.1 Caracterização da área experimental.....	18
3.2 Delineamento experimental	20
3.3 Crescimento das árvores	21
3.3.1 Parte aérea.....	21
3.3.2 Raiz fina.....	22
3.3.3 Biomassa de nódulos.....	24
3.4 Análise estatística	24
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	25
4.1 Crescimento da parte aérea.....	25
4.2 Desenvolvimento de raiz fina nas camadas do solo.....	28
4.3 Desenvolvimento de raiz fina em função da idade.....	33
4.4 Desenvolvimento de raízes finas em relação à posição de amostragem.....	35
4.4.1 Próximo à árvore.....	35
4.4.2 Meio da entrelinha e da linha de plantio.....	37
4.5 Biomassa de nódulos.....	42
5 CONCLUSÕES	45
REFERÊNCIAS.....	46

RESUMO

Raramente plantações de eucalipto respondem à adubação nitrogenada. Contudo, por se tratar de povoamentos monoespecíficos, com baixa capacidade de fixação de N, depois de algumas rotações de cultivo a probabilidade de resposta a este nutriente aumenta, devido ao esgotamento das reservas naturais de nitrogênio do solo acumuladas no ecossistema anterior. O presente estudo teve como objetivos avaliar i) o crescimento, o desenvolvimento de raízes finas de *Eucalyptus grandis* e de *Acacia mangium* em povoamentos monoespecíficos e mistos; ii) a nodulação da *A. mangium* nestes povoamentos. As árvores foram plantadas em maio de 2003 no espaçamento 3m x 3m. O delineamento experimental foi o de blocos completamente aleatorizados (4 blocos), sendo avaliados 3 tratamentos: povoamentos monoespecíficos de *E. grandis* e *A. mangium* e um povoamento em que essas espécies foram consorciadas (1100 plantas por ha de *E. grandis* e 550 árvores por ha de *A. mangium*). Quando consorciada, a *A. mangium* foi plantada no meio da distância entre as árvores de *E. grandis* na mesma linha de plantio. Foram amostradas raízes finas vivas (≤ 3 mm) em 5-16 posições (dependendo do tratamento), de uma árvore de área basal média em doze parcelas (3 tratamentos x 4 blocos), até 1 m de profundidade aos 6 e 12 meses pós-plantio e até 2 m de profundidade aos 18 e 30 meses pós-plantio, por meio de uma sonda de aço com 4,5 cm de diâmetro interno. O *E. grandis* foi diferente da *A. mangium* quanto ao desenvolvimento radicular nos diferentes períodos de amostragem, principalmente na camada superficial do solo (0-10 cm). No povoamento misto, aos 30 meses pós-plantio, o *E. grandis* foi 64% maior em altura do que a *A. mangium* e 75% maior em área basal, produzindo 94% mais biomassa do que esta leguminosa. A assimetria do crescimento radicular foi elevada entre as espécies, reflexo da grande competição por luz na parte aérea. Não houve clara estratificação de exploração das camadas do solo pelo sistema radicular das espécies. O *E. grandis* apresentou maior exploração radicular em todas as camadas do solo, fazendo com que o desenvolvimento radicular da *A. mangium* ficasse restrito a proximidade da árvore. O elevado grau de assimetria no desenvolvimento radicular entre as espécies resultou, aos 30 meses, na camada 0-10 cm, numa diferença de 91% na densidade de raízes finas (drf) entre as espécies. A nodulação foi sensível a competição com o *E. grandis*, aparentemente, devido à variação de umidade e temperatura sazonal. Aos 18 meses, no povoamento monoespecífico, houve tendência de maior densidade de nódulos na linha de plantio, camada 0-10 cm. Aos 30 meses os nódulos foram encontrados próximos às árvores. No misto, aos 18 e 30 meses ocorreu diminuição da densidade de nódulos na camada 10-30 cm e aumento entre 30 e 50 cm.

Palavras-chaves: Leguminosa; Acácia; Fixação de nitrogênio; Eucalipto; Sistema radicular; Adubação; Competição; Nódulos

ABSTRACT

Eucalypts plantations rarely answer to the nitrogen fertilization. However, for being of monospecific stands, with low capacity of N fixation, after some cultivation rotations the answer probability to this nutritious one increases, due to the exhaustion of the natural reservations nitrogen of the soil accumulated in previous ecosystem. The present study had as objectives to evaluate i) the growth, the development of *Eucalyptus grandis* and *Acacia mangium* fine-root in monospecific and mixed stands; ii) the *A. mangium* nodulation in these stands. The trees were planted in may of 2003 in the spacing 3m x 3m. The experimental design was it of completely randomized blocks (4 blocks), between assessed 3 treatments: Monospecific stands of *E. grandis* and *A. mangium* and a stand in that those species were mixed (1100 plants for ha of *E. grandis* and 550 trees for ha of *A. mangium*). When mixed, to *A. mangium* was planted in the middle of the distance among the trees of *E. grandis* in the same plantation line. They were sampling live fine-root (≤ 3 mm) in 5-16 positions (depending on the treatment), of a tree of medium basal area in twelve portions (3 treatments x 4 blocks), until 1 m of depth to the 6 and 12 months powder-plantation and until 2 m of depth to the 18 and 30 months powder-plantation, by means of a sledgehammer with 4,5 cm of internal diameter. The *E. grandis* was different from the *A. mangium* with relationship to the roots development in the different sampling periods, mainly in the superficial layer of the soil (0-10 cm). In the mixed stand, between 29 and 30 months after plantation, *E. grandis* was 64% larger in height than at *A. mangium* and 75% larger in basal area, producing 94% more biomass than this leguminous. The asymmetry of the root growth was elevated between the species, reflex of the great competition for light in the aerial part. There was not clear stratification of exploration of the layers of the soil for the roots system of the species. The *E. grandis* presented larger roots exploration radicular in all the layers of the soil, doing with that the roots development of the *A. mangium* was restricted in the proximity of the tree. The high asymmetry degree in the roots development between the species, resulted to the 30 months in the layer 0-10 cm, a difference of 91% in the density of fine roots (dfr) between the species. The nodulation was sensitive the competition with the *E. grandis*, seemingly, due to the humidity variation and seasonal temperature. To the 18 months, in the monospecific stands, there was tendency of larger density of nodules in the plantation line, layer 0-10 cm. To the 30 months the nodules were found close to the trees. In the mixed, to the 18 and 30 months it happened decrease of the density of nodules in the layer 10-30 cm and increase between 30 and 50 cm.

Keywords: Leguminous; Acacia; Nitrogen fixation; Eucalypts; Radicular system; Fertilization; Competition; Nodules

1 INTRODUÇÃO

Eucalyptus e *Acacia* estão entre os gêneros de árvores mais plantados nos trópicos (FAO, 2001). Geralmente são povoamentos comerciais monoespecíficos, onde a madeira é utilizada na produção industrial. Sobre estes povoamentos aumentaram as preocupações a respeito dos custos de fertilizantes, redução da biodiversidade e perdas de produtividade devido às pragas e doenças (FAO, 1992).

Em áreas recém-plantadas, utilizando espécies de rápido crescimento, o estoque de N contido na matéria orgânica pode suprir a exigência das árvores por meio da mineralização do N orgânico (SERRANO, 1997; O'CONNELL et al., 1999; GONÇALVES; BARROS, 1999). Nessas áreas é comum a pequena ou até mesmo a ausência de resposta à fertilização nitrogenada (BARROS et al., 1990; HEBERT; SCHONAU, 1990; GONÇALVES et al., 1997). Entretanto, com o manejo intensivo do solo associado ao rápido crescimento de espécies florestais poderá resultar na rápida diminuição dos estoques de N do solo (O'CONNELL et al., 1999), devido às altas taxas de exportação do N (REIS et al., 1987) e do possível esgotamento das reservas de N orgânico potencialmente mineralizável. Observações empíricas, bem como estudos de ciclagem biogeoquímica e modelagem mostraram uma tendência geral de aumento da exigência por fertilizantes nitrogenados devido a sucessivas rotações de plantios comerciais de eucalipto (GONÇALVES et al., 2004; LACLAU et al., 2005; CORBEELS et al., 2005). Em algumas regiões do Brasil, plantios de eucalipto mostraram-se responsivos à fertilização nitrogenada (SILVEIRA et al., 2000).

Plantios mistos, em que o eucalipto e espécies arbóreas capazes de fixar N₂ crescem no mesmo povoamento, apresentam potencial de melhorar a ciclagem de nutrientes (BINKLEY et al., 1992; FORRESTER et al., 2005), aumentar a fertilidade do solo (MONTAGNINI, 2000; GARAY et al., 2004), aumentar a produção de biomassa (BINKLEY et al., 2003; FORRESTER et al., 2004), aumentar o seqüestro de C (KAYE et al., 2000; RESH et al., 2002; FORRESTER et al., 2006), melhorar as propriedades físicas e aumentar a diversidade biológica do solo (GARAY et al., 2004), aumentar a diversificação de produtos (MONTAGNINI et al., 1995; KHANNA, 1997; MONTAGNINI, 2000) e proteger as árvores contra pragas e doenças (MONTAGNINI et al., 1995; DEBELL et al., 1997; MEDHURST et al., 2003).

Muitos trabalhos envolvendo plantios mistos foram realizados. Alguns mostraram resultados favoráveis à associação entre as espécies (DEBELL et al., 1997; KHANNA, 1997; BAUHUS et al., 2000; MONTAGNINI et al. 2000; BALIEIRO, 1999; BALIEIRO, et al. 2002; BINKLEY et al., 2003; FORRESTER et al., 2004; GARAY et al., 2004; LACLAU et al., 2005). Outros apresentaram resultados em que não foram observadas diferenças entre povoamentos mistos e monoespecíficos ou ocorreram efeitos desfavoráveis (BINKLEY; GIARDINA, 1997; HUNT et al., 1999; PARROTA, 1999; COELHO et. al., 2007; LACLAU et al., 2007). Estudos envolvendo plantações mistas de eucaliptos e leguminosas herbáceas não apresentaram resultados favoráveis. Principalmente pela maior exigência nutricional das plantas herbáceas e pelo seu baixo poder competitivo por luz, água e nutrientes em relação ao eucalipto (PASSOS, 1990; ALMEIDA et al., 1994).

Os principais motivos relacionados ao sucesso ou insucesso do manejo de povoamentos mistos são: o arranjo e o modelo de associação entre as espécies (KAYE et al., 2000); a composição, a quantidade e a velocidade de decomposição da serapilheira das espécies fixadoras de N₂ (ANDRADE et al., 2000); a existência de alelopatia (SHIBU et al., 2006); a eficiência dos inoculantes (GALIANA et al., 2002); condições edafoclimáticas (ANDRADE et al., 2000); a fertilidade inicial do solo e a ciclagem biogeoquímica (PARROTA, 1999; ANDRADE et al., 2000) e a acidez do solo (KAYE et al., 2000; GALIANA et al., 2002; MARTIN et al., 2003).

Pesquisas adicionais são necessárias em relação às práticas silviculturais capazes de promover efeitos positivos nos povoamentos mistos, principalmente pela influência das leguminosas por meio do aumento da disponibilidade de N no solo, sem que ocorra competição significativa com o eucalipto durante a fase inicial de crescimento do povoamento (LACLAU et al., 2005). É importante aumentar os conhecimentos sobre o desenvolvimento de raízes finas em povoamentos mistos. Estes contribuirão para o melhor planejamento das relações entre as espécies e facilitarão a adoção de práticas de intervenção, como desbaste e aplicação de fertilizantes para o controle da competição (BAUHUS et al., 2000). A baixa capacidade de planejar povoamentos mistos de sucesso, com interações positivas entre as espécies, deve-se

ao limitado conhecimento sobre as interações competitivas e complementares que ocorrem no solo (SHIBU et al., 2006).

A hipótese de pesquisa neste trabalho foi: “O *Eucalyptus grandis* possui maior desenvolvimento radicular e interage positivamente com a *Acacia mangium* em povoamentos mistos”.

O presente estudo teve como objetivos avaliar i) o crescimento, o desenvolvimento de raízes finas de *Eucalyptus grandis* e de *Acacia mangium* em povoamentos monoespecíficos e mistos; ii) a nodulação da *A. mangium* nestes povoamentos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Em povoamentos mistos, a compreensão das interações ecológicas no solo ainda é bastante limitada. Compreender na totalidade, quando e como ocorre a competição entre as raízes finas das espécies por recursos, bem como sua relação com o desenvolvimento aéreo e a importância ecológica das interações, necessitam de um amplo conhecimento biológico (CASPER; JACKSON, 1997).

É difícil prever quais combinações de espécies conduzem a aumentos em produtividade quando existem poucas informações disponíveis. Isto não só depende dos atributos das espécies, mas também de fatores locais como disponibilidade de água e nutrientes (FORRESTER et al., 2005; COELHO, et al., 2007). O conhecimento prévio destes fatores pode garantir o sucesso da associação entre as espécies (FORRESTER et al., 2005; COELHO et al., 2007), pela otimização das interações desejáveis, como a simbiose das leguminosas com bactérias diazotróficas e a aceleração da ciclagem de nutrientes (BINKLEY; GIARDINA, 1997), conseqüentemente aumentando a produtividade (FORRESTER et al., 2006). Uma maior produtividade dos plantios consorciados em relação aos plantios monoespecíficos, ocorre somente quando a interação entre as duas espécies aumenta a eficiência de uso de uma fonte de nutriente ou se uma delas aumentar o fornecimento de alguma fonte (BAUHUS et al., 2000). Diversos estudos demonstraram que quando o N era uma fonte limitante no solo, o eucalipto teve seu crescimento estimulado quando consorciado com uma espécie arbórea fixadora de N₂ (BINKLEY et al., 1992; DEBELL et al. 1997; KHANNA, 1997). Segundo Vezzani et al. (2001), em povoamentos mistos, desde a fase inicial até a formação da copa ocorre uma competição por recursos (água, luz e nutrientes) entre a leguminosa e a espécie principal. Sendo o incremento de N neste sistema visto somente em longo prazo, considerando sua liberação pela decomposição de galhos e folhas descartados pela leguminosa, exsudação de substâncias orgânicas e decomposição das raízes. Posteriormente, após a formação da copa, a leguminosa pode acelerar a ciclagem de nutrientes da serapilheira pela redução da relação C/N do material depositado no povoamento, estimulando assim a ação dos microrganismos decompositores e a conseqüente liberação de nutrientes.

Nos povoamentos mistos, o modelo de distribuição das espécies e o manejo silvicultural dependem de objetivos específicos, tais como: produção de madeira, aumento da reserva de N no solo, diversidade estrutural, melhoria da forma ou qualidade da madeira (FORRESTER, et al., 2005; 2006).

O que é comumente medido como competição intra e interespecífica é o efeito líquido de todas as interações entre plantas (que pode ter efeitos positivos ou negativos) (FORRESTER et al., 2006; SHIBU et al., 2006). Dependendo da intensidade e tipo de interações nos povoamentos mistos, pode haver supressão, diminuição ou aumento do crescimento (KHANNA, 1997; BAUHUS et al., 2000; FORRESTER et al., 2004; 2005; 2006).

Para entender porque alguns povoamentos mistos são mais ou menos produtivos do que povoamentos monoespecíficos, é necessário examinar mais de perto as interações ecológicas que ocorrem durante a associação das espécies (FORRESTER et al., 2004). Segundo Vandermeer (1989; 1995) e Kelly (1992), existem três tipos de interações: competição, redução competitiva e facilitação. A competição ocorre quando duas ou mais plantas ou ainda populações interagem provocando efeitos negativos sobre os indivíduos, geralmente há redução do crescimento ou mortalidade (VANDERMEER, 1989; 1995). A redução competitiva, ocorre quando a competição interespecífica em povoamentos mistos é menor do que a competição intra-específica nas monoculturas (KELTY; CAMERON, 1995). Nesta relação, normalmente ocorre divisão dos recursos entre as espécies acima do solo (luz) ou no solo (água ou nutrientes) (KELTY; CAMERON, 1995). A divisão é uma consequência da separação em diferentes nichos de exploração por recursos (estratificação da copa e raízes finas) e na utilização mais eficiente de recursos. Já a facilitação se dá através de uma espécie produzindo efeitos positivos sobre a outra. Como exemplo, espécies capazes de fixar nitrogênio e disponibilizar o nutriente para a outra espécie (VANDERMEER, 1989; 1995; SHIBU et al., 2006). Esta interação é mais evidente em locais onde as plantas estão expostas a algum tipo de estresse por algum momento, como as altas ou baixas temperaturas (HOLMGREN et al., 1997). Embora estas interações raramente ocorram isoladas, é importante saber como elas afetam o crescimento das árvores e como sua influência altera o desenvolvimento dos povoamentos (FORRESTER et al., 2004).

O equilíbrio entre competição e facilitação pode variar em relação à disponibilidade de recursos do solo, determinando assim níveis de produção e estrutura da comunidade (BOYDEN et al., 2005; FORRESTER et al., 2006). Os padrões de produtividade em povoamentos mistos, são resultado da combinação da maior eficiência de uso dos nutrientes pelo eucalipto, maior ciclagem de nutrientes debaixo da leguminosa, maior captura de luz, bem como a alta eficiência em seu uso no consórcio. (BINKLEY et al., 1992). A capacidade e a eficiência de exploração do solo são determinadas pela área superficial das raízes finas, comprimento específico de raiz, distribuição das raízes dentro do perfil do solo, plasticidade das raízes, arquitetura radicular, velocidade de absorver água e nutrientes. Esses processos acontecem no solo e regulam a facilitação e a competição entre as espécies em povoamentos mistos (BAUHUS et al., 2000; SHIBU et al., 2006).

As interações competitivas entre as espécies são divididas em dois grupos; acima do solo, competição por luz e no solo, competição por água e nutrientes. As duas interações não ocorrem de forma independente (KELTY, 1992). Acima do solo, o sucesso de povoamentos mistos deve-se a estratificação da copa, com rápido crescimento da espécie intolerante à sombra e menor crescimento da espécie tolerante à sombra (KHANNA, 1997; BAUHUS et al., 2000; FORRESTER et al., 2004, COELHO et al., 2007). A estratificação da copa pode levar ao aumento da interceptação da luz e ao uso mais eficiente do recurso pelo estrato superior (BALIEIRO et al., 2002; FORRESTER et al., 2006; COELHO et al., 2007). Semelhante a estratificação da copa, pode ocorrer estratificação do sistema radicular. Para Forrester et al. (2006), a estratificação do sistema radicular é importante para a coexistência de diferentes espécies no mesmo povoamento, principalmente se os recursos de crescimento forem limitantes. Ainda segundo os autores, a redução do potencial de competição no solo pelas raízes finas ocorre através da estratificação química ou física do sistema radicular. Na estratificação química as espécies empregam diferentes estratégias para a obtenção de nutrientes. Esse tipo de estratificação talvez ocorra quando diferentes espécies de plantas se associam a diferentes tipos de micorrizas (SCHULZE et al., 1994). Desta forma, a estratificação química pode acontecer em plantações mistas de eucalipto com espécies fixadoras de N_2 , em certas fases do desenvolvimento do plantio,

quando são formadas diferentes associações. A estratificação física ocorre por diferenças na distribuição de raízes finas no solo, afetando as estratégias de exploração (FORRESTER et al., 2006). A competição por recursos do solo deve aumentar proporcionalmente com a competição por luz das árvores. Uma menor tolerância à sombra e uma maior disponibilidade de nutrientes favorecem o desenvolvimento do tronco, devido à maior alocação de C, aumentando-o mais em altura do que em diâmetro ou crescimento de raízes, a fim de manter sua posição no dossel (FORRESTER et al., 2004; FORRESTER et al., 2005).

Apesar da estratificação da copa e do sistema radicular poder permitir a coexistência das duas espécies no mesmo povoamento, o grau de assimetria entre as espécies pode ter grande importância no desenvolvimento do plantio misto. Desta forma, se o grau de assimetria no crescimento entre as espécies for muito elevado, pode ocorrer o domínio de uma espécie e supressão da outra (HARA, 1986; FORRESTER et al., 2006). Na parte aérea a competição por luz é frequentemente assimétrica porque plantas altas podem obscurecer plantas pequenas (FORRESTER et al., 2006). A competição por recursos no solo, como água e nutrientes, é teoricamente mais simétrica, devido às raízes das plantas menores absorverem a mesma quantidade de recursos por área radicular (WEINER, 1986). Porém, variações na arquitetura das raízes finas, taxa de crescimento, distribuição e associações micorrízicas também podem conduzir a uma competição assimétrica no solo (FORRESTER et al., 2006). O grau de assimetria entre as espécies depende da disponibilidade de recursos pelos quais as plantas estão competindo intensamente (WEINER, 1990; HARA, 1986). A competição assimétrica conduz a um aumento em tamanho e desigualdade com tempo, porque faltam recursos para os indivíduos menores e estes acabam crescendo menos (HARA, 1986).

Segundo Begon et al. (1996), espécies diferentes que possuam idênticos nichos ecológicos não podem existir ao longo do tempo no mesmo hábitat. A coexistência estável de duas espécies só é possível onde a competição intra-específica é maior do que a competição interespecífica para ambas espécies. Enquanto que a competição intraespecífica resulta em uma reação simétrica dos indivíduos e condução para a diminuição da absorção de recursos por indivíduo, a competição interespecífica resulta

na diminuição da sobrevivência ou do crescimento devido a maior exploração por recursos ou interferência de uma espécie sobre a outra. Em povoamentos mistos, quanto mais semelhantes forem as necessidades entre as espécies, mais intensa será a competição. É provável que a competição no solo aconteça quando duas ou mais espécies desenvolvem um sistema de raízes finas especializado na exploração dos mesmos estratos do solo.

É difícil separar no solo, a competição por água da competição por nutrientes (RADERSMA et al., 2005). Para Shibu et al. (2006), a competição tanto por água quanto por nutrientes no solo é importante na determinação da produtividade em povoamentos mistos. Segundo os autores, uma espécie capaz de aumentar a absorção de água através da exploração radicular em camadas mais profundas do solo, apresentará maior acesso ao recurso do que uma outra espécie que apresenta maior exploração de raízes finas nas camadas superficiais do solo. Esta separação dos nichos pode diminuir a competição por água; porém, a competição por nutrientes pode aumentar entre as espécies, devido ao maior crescimento da espécie que teve acesso à água nas camadas mais profundas. A separação entre nichos ou redução da competição por estes recursos ajuda as espécies à co-existirem em povoamentos mistos. Para Allen et al. (2004), na competição interespecífica no solo de povoamentos mistos, a facilitação pode ocorrer quando as raízes finas das espécies arbóreas ocupam diferentes (pelo menos parcialmente) camadas de solo. As espécies que concentram o desenvolvimento de raízes finas nas camadas superficiais, facilitam o uso de recursos do solo que foram lixiviados e estão além do alcance de suas raízes finas, criando assim uma "faixa de segurança" para as espécies de exploração radicular das camadas mais profundas do solo. Isto aumentaria a eficiência de utilização dos recursos do sistema.

Segundo Gonçalves et al. (2001) e Laclau et al. (2004), a camada superficial possui maior disponibilidade de nutrientes para as árvores, sendo ela enriquecida nutricionalmente através da maior intensidade da ciclagem biogeoquímica. Daí o fato de se encontrar maior quantidade de raízes finas até 30 cm de profundidade (COELHO, 2006; MELLO et al., 2004 e BAUHUS et al., 2000) e a importância em se concentrar o crescimento de raízes finas na camada superficial. A competição no solo é dependente

da capacidade e eficiência de exploração pelo sistema de raízes finas de cada espécie e dos custos de carbono (C) envolvidos (FITTER et al., 1994).

As distribuições espaciais e temporais das raízes das árvores são conhecidas por variar com a espécie, com a árvore consorciada e com os fatores edáficos do local (AKINNIFESI et al., 1999), a umidade do solo e temperatura (EISSENSTAT et al., 2000; ANDERSON et al., 2003). Quando a umidade do solo aumentou, Caldwell et al. (2005) demonstraram que houve produção de raízes finas e que conforme esta umidade diminuía as raízes finas desapareciam, na mesma proporção. Observaram também que os períodos de maior disponibilidade de água no solo coincidiam com os períodos de maior atividade de crescimento da parte aérea e de raízes.

Em relação à formação de nódulos, esta é relativa e segundo alguns pesquisadores pode estar relacionada a vários fatores como: disponibilidade de N mineral no ecossistema (BODDEY et al., 2000); mudança no grau de nodulação em resposta ao manejo (WONG et al., 1989) e fatores climáticos e edáficos (MOREIRA, 2002).

Binkley et al. (1992; 2003) observaram que o crescimento de árvores fixadoras de N₂ é freqüentemente limitado pela indisponibilidade de P no solo e, qualquer fator limitante pode prejudicar as taxas de fixação de N₂. A redução dos efeitos da limitação de P provavelmente pela fertilização aumentará a entrada de N no ecossistema, conduzido pela variedade de outras mudanças no ecossistema. O efeito da adição de P foi maior para a fixação de N do que para o crescimento. A adição de P dobrou a quantidade de N fixado pelas mudas de *Albizia facaltaria*. Porém a adição de N não teve nenhum efeito na massa das mudas de *A. facaltaria* ou na fixação de N por mudas. No entanto mudas fertilizadas com N absorveu duas vezes mais N do solo abaixando a contribuição porcentual da fixação de N das mudas de 81% para 60%. No presente estudo P foi aplicado em grande quantidade ao plantio (18 - 33 kg ha⁻¹) para não ser limitante ao crescimento das árvores nem para a fixação biológica das *A. facaltaria*.

Para Franco e Faria (1997), a produtividade em longo prazo do sistema é dependente da acumulação de matéria orgânica, liberação de P fixado e do estabelecimento de uma reserva de P. Se a produção da planta é limitada pelo N, a transferência de P para a biomassa é limitada, aumentando assim a fixação de P. Por

outro lado, a deficiência de P limitará a acumulação de N porque plantas dependentes de N simbiótico tem alta demanda por P. Resumindo, a produtividade a longo prazo em solos degradados é altamente dependente da disponibilidade de nutrientes, de microorganismos diazotrópicos e de outras possíveis associações planta-micróbicas.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da área experimental

O estudo foi conduzido na Estação Experimental de Ciências Florestais de Itatinga, SP, pertencente à Universidade de São Paulo. A área está localizada a 23° 02' 01" Sul de latitude, 48° 38' 34" Oeste de longitude e altitude média de 830 m. O clima local é mesotérmico úmido (Cwa), segundo a classificação de Köppen. A precipitação média anual dos últimos 15 anos foi de 1.360 mm, com estação fria entre os meses de junho até setembro. A temperatura média mínima está em torno de 12,8° C e a média anual é de 19,4 °C (Figura 1).

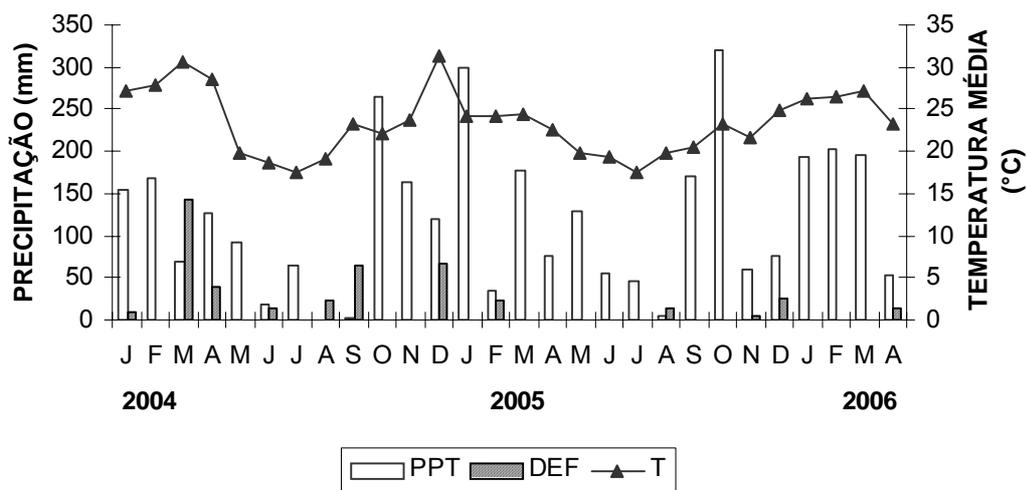


Figura 1 - Precipitação pluviométrica (PPT), déficit hídrico (DEF) e temperatura média (T) da área experimental de janeiro de 2004 a abril de 2006

A área de estudo é típica do Planalto Ocidental de São Paulo, com topografia suave ondulada. O experimento foi instalado em uma área plana com declividade inferior a 3%. O solo foi classificado como um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico textura média (EMBRAPA, 1999), desenvolvido sob arenito cretáceo, formação Marília, grupo Bauru. A uniformidade textural foi alta, contendo em torno de 12% de argila no horizonte A₁, variando de 20% a 25% entre 1 - 6 m de profundidade. O pH foi ácido (entre 4,5 e 5,0) e as quantidades disponíveis de nutrientes na forma orgânica neste

solo foram muito baixas. A CTC variou entre 0.5 e 3 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ de 0 - 3 m de profundidade do solo e a quantidade de “bases trocáveis” foi menor do que 0,2 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, após 5 cm de profundidade (Tabela 1). O C, H e N foram analisados e determinados pelo LECO. O P disponível foi determinado pela resina de troca iônica (RAIJ et al., 2001). Os elementos trocáveis foram determinados por ICP após extrações por KCl e NH_4Cl .

A vegetação natural da região é o cerrado. Entre 1940 e 1998, a área experimental foi florestada com *Eucalyptus saligna*. Foram feitas cinco colheitas de madeira (corte raso), em rotações sucessivas de manejo pelo sistema de talhadia, sem a aplicação de fertilizantes. Os tocos foram desvitalizados com a aplicação de glifosato e mudas de *E. grandis* foram plantadas em 1998 com baixa aplicação de fertilizantes (300 kg ha^{-1} NPK 10:20:10). Os altos níveis de exportações de nutrientes com a colheita de madeira associada à falta de fertilização entre 1940 e 1998 fizeram desta uma área de potencial resposta do *E. grandis* em relação à aplicação de N.

Tabela 1 - Propriedades do solo selecionadas no experimento. Amostras foram coletadas em 3 covas (100A:0E, 0A:100E e 50A:100E), um ano depois do estabelecimento do experimento. CO (carbono orgânico); N tot. (nitrogênio total); SB (soma de bases catiônicas). Desvios padrões das repetições nos tratamentos (n = 3)

Prf (cm)	pH _{H₂O} - pH _{KCl}	CO ⁽¹⁾ g kg ⁻¹	N tot. ⁽¹⁾ g kg ⁻¹	P Disp. ⁽²⁾ mg kg ⁻¹	Argila	Silte	Areia
					%		
0-5	5.6 – 4.9	17.6 (6.7)	0.9 (0.3)	4.0 (0.8)	11.4 (1.2)	4.1 (1.2)	84.5 (1.6)
5-15	5.6 – 4.7	6.4 (1.2)	0.3 (0.3)	2.5 (0.4)	12.8 (1.2)	3.1 (0.5)	84.1 (1.3)
15-30	5.4 – 4.7	5.7 (0.9)	0.4 (0.0)	2.3 (0.6)	12.8 (1.2)	2.8 (0.5)	84.4 (1.1)
30-50	5.6 – 4.9	4.4 (0.5)	0.3 (0.0)	1.4 (0.1)	13.4 (1.2)	3.7 (0.8)	82.9 (0.3)
50-100	5.8 – 5.0	3.5 (0.1)	0.2 (0.0)	1.3 (0.4)	16.1 (0.0)	3.4 (0.3)	80.5 (0.3)
100-200	5.9 – 5.2	2.6 (0.2)	0.2 (0.0)	1.2 (0.1)	18.1 (0.0)	4.1 (0.4)	77.8 (0.4)
Elementos trocáveis ⁽³⁾							
Prf (cm)	K	Ca	Mg	Na	SB	CTC	
	$\text{cmol}_c \cdot \text{kg}^{-1}$						
0-5	0.02 (0.01)	0.46 (0.17)	0.42 (0.06)	0.02 (0.02)	0.97 (0.24)	1.76 (0.47)	
5-15	0.01 (0.00)	0.02 (0.00)	0.06 (0.01)	0.01 (0.01)	0.12 (0.01)	0.95 (0.04)	
15-30	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	0.02 (0.01)	0.00 (0.00)	0.05 (0.02)	0.79 (0.09)	
30-50	0.01 (0.00)	0.00 (0.00)	0.01 (0.00)	0.00 (0.00)	0.04 (0.01)	0.72 (0.01)	
50-100	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	0.01 (0.00)	0.00 (0.00)	0.02 (0.00)	0.58 (0.02)	
100-200	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	0.01 (0.00)	0.00 (0.00)	0.02 (0.00)	0.44 (0.05)	

⁽¹⁾ análise e determinação de C H N (LECO); ⁽²⁾ Resina de troca iônica (Raij et al., 2001); ⁽³⁾ determinação por ICP após extrações KCl e NH_4Cl .

3.2 Delineamento experimental

O povoamento de *Eucalyptus grandis* foi colhido em dezembro de 2002. Somente os troncos (madeira e casca) foram removidos da área experimental e os resíduos de colheita foram esgalhados uniformemente no campo. Em maio de 2003 foi instalado o experimento na forma de blocos completos aleatorizados, com 7 tratamentos (100 árvores por tratamento) e 4 blocos. Os tratamentos foram:

100A:0E = *A. mangium* plantada no espaçamento 3 m x 3 m, sem fertilização de N;

0A:100E = *E. grandis* plantado no espaçamento 3 m x 3 m, sem fertilização de N;

0A:100E+N = Idem 0A:100E, mas com aplicação de 120 kg N ha⁻¹;

25A:100E = Idem 0A:100E, consorciado com *A. mangium* na densidade de plantio de 25% da densidade do eucalipto;

50A:100E = Idem 0A:100E, consorciado com a *A. mangium* plantada na densidade de plantio de 50% da densidade do eucalipto;

100A:100E = Idem 0A:100E, consorciado com *A. mangium* plantada na densidade de plantio de 100% da densidade do eucalipto;

50A:50E = povoamento misto na proporção de 1:1 entre *E. grandis* e *A. mangium* (555 árvores ha⁻¹ de cada espécie), sem fertilização de N.

O preparo de solo consistiu de uma subsolagem a 40 cm de profundidade, restrita às linhas de plantio. Foram plantadas mudas seminais de *Eucalyptus grandis* (monoprogênie da Companhia Suzano de Papel e Celulose) no espaçamento 3 m x 3 m. As mudas de *A. mangium* foram inoculadas com uma variedade de *Rhizobium* especificamente selecionada para esta espécie pela EMBRAPA (Rio de Janeiro) (Qual a denominação e local correto desta unidade da Embrapa? Consultar na internet.) As mudas desta leguminosa foram plantadas no meio da distância entre as árvores de eucalipto na mesma linha de plantio, nos tratamentos 25A:100E, 50A:100E e 100A:100E, evitando-se modificar a acessibilidade nestes tratamentos (Figura 1). Esta disposição das árvores nos povoamentos mistos facilita os tratos culturais mecanizados nas entrelinhas de plantio, como realizado em plantios comerciais.

A fertilização usada neste estudo é semelhante à usada na silvicultura comercial da região, em solos semelhantes. Experimentos prévios mostraram que as quantidades

de nutrientes aplicados não seriam limitantes para o crescimento das árvores. No plantio foram aplicados em área total 2 Mg ha⁻¹ de calcário dolomítico. Em covetas laterais, a 20 cm das plantas, foram aplicados 202 g planta⁻¹ de superfosfato triplo (45% P₂O₅), 30 g planta⁻¹ de KCl (60% de K₂O), 27 g planta⁻¹ de FTE BR12 (fonte de micronutrientes), 27 g planta⁻¹ de ulexita parcialmente acidificada (10% de B). Somente no 0A:100E+N foram aplicados 30 kg N ha⁻¹ (nitrato de amônio) no plantio. Foram realizadas três fertilizações complementares com 80 kg ha⁻¹ de KCl (60% de K₂O) aos 6, 12 e 18 meses pós-plantio em todos tratamentos, bem como 30 kg N ha⁻¹ (nitrato de amônio) no 0A:100E+N nas mesmas datas (total de 120 kg N ha⁻¹).

Para a estimativa da biomassa, alguns tratamentos foram repetidos fora do experimento (10 linhas dos dois lados de cada bloco). As amostragens destrutivas foram feitas principalmente nestas áreas sem perturbar o crescimento dentro dos tratamentos. Porém, o número de árvores de *A. mangium* no 50A:100E não foi suficiente nas bordaduras e várias árvores foram amostradas aos 18 e 30 meses pós-plantios no 50A:100E do bloco 4.

3.3 Crescimento das árvores

3.3.1 Parte aérea

A circunferência à altura do peito (CAP; 1,30cm) e a altura foram medidas excluindo as duas linhas de bordadura em todos tratamentos (36 à 72 árvores por tratamento) aos 4, 6, 9, 12, 17, 24, 29 e 37 meses pós-plantio. O diâmetro da copa foi medido aos 6, 9 e 12 meses pós-plantio para todas as árvores em duas direções perpendiculares. A maioria das árvores de *A. mangium* apresentaram ramificações do tronco, sendo medida nos inventários a circunferência de todos os brotos com um diâmetro à altura do peito (DAP) > 2 cm. Para cada árvore ramificada, as áreas basais à altura do peito de todos os ramos foram somadas, sendo calculado um “diâmetro equivalente”.

A biomassa da parte aérea foi estimada por meio da amostragem de 6 árvores distribuídas sobre a variação dos valores das alturas no 100A:0E e 0A:100E aos 6

meses pós-plantio. Aos 12, 18 e 30 meses pós-plantio, 6, 8 e 10 árvores de cada espécie foram amostradas sobre a variação da área basal, respectivamente, nos três tratamentos (100A:0E, 0A:100E e 50A:100E). Além disso, 10 árvores de cada espécie foram amostradas no tratamento 50A:50E. Foram separados das árvores os seguintes componentes: folhas, galhos vivos, galhos mortos, tronco e casca do tronco. O tronco de cada espécie foi seccionado a cada 1 m até 18 meses pós-plantio e a cada 3 m até 30 meses. Diâmetros, comprimentos e massas foram medidos no campo, bem como a circunferência com casca e sem casca a cada metro. A folhagem das árvores foi dividida em três terços de acordo com a altura das árvores aos 18 e 30 meses pós-plantio.

3.3.2 Raízes finas

A biomassa de raízes finas foi quantificada aos 6, 12, 18 e 30 meses pós-plantio, em 100A:0E, 0A:100E e 50A:100E. As raízes finas foram amostradas de 5-16 posições (dependendo do tratamento), de uma árvore de área basal média em doze parcelas (3 tratamentos x 4 blocos), até 1 m de profundidade aos 6 (11/2003) e 12 meses (05/2004) pós-plantio e até 2 m de profundidade aos 18 (11/2004) e 30 meses (11/2005) pós-plantio (Figura 2). Para a amostragem de raízes finas utilizou-se uma sonda de aço com 4,5 cm de diâmetro interno. As raízes finas foram amostradas nas seguintes camadas do solo: 0-10 cm, 10-30 cm, 30-50 cm, 50-100 cm em todas as idades, 100-150 cm e 150-200 cm aos 18 e 30 meses pós-plantio.

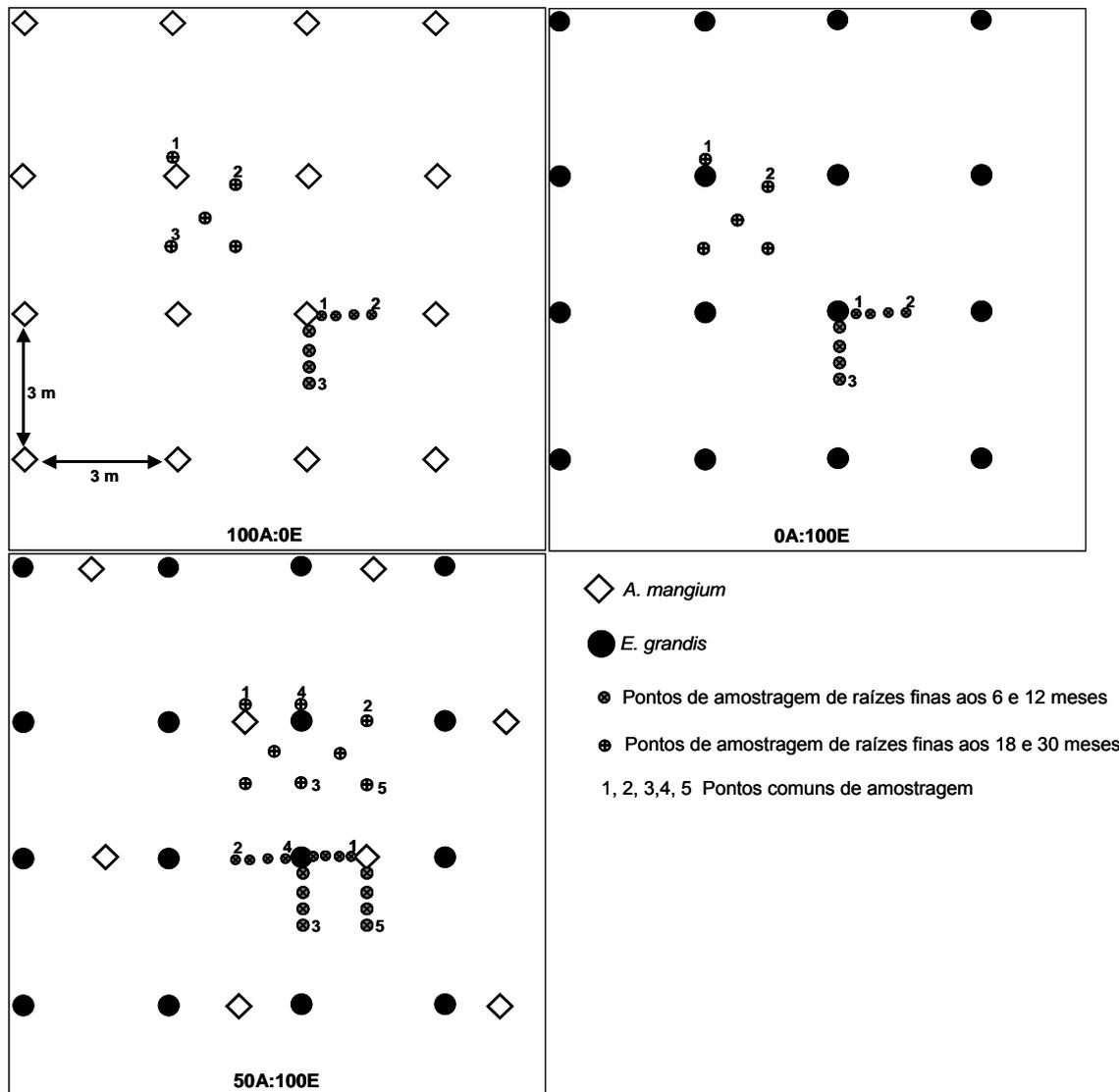


Figura 2 - Esquema da distribuição das árvores e dos pontos de amostragem nos tratamentos 100A:0E, 0A:100E e 50A:100E

Por meio da lavagem em água corrente em peneira com 550 μm de malha, retirou-se todo o solo das amostras de raiz fina. A mistura restante (raízes finas vivas das árvores de interesse, fragmentos de folhas, raízes mortas, raízes de outras plantas e outros materiais orgânicos em decomposição) foi armazenada em pequenos recipientes contendo álcool a 70% (JOHANSEN, 1940), permitindo que a estrutura das raízes fosse fixada, conservando as características originais de coleta. Após a conclusão da etapa de preparo das amostras, separou-se as raízes finas vivas das raízes mortas e das impurezas utilizando pinças e uma bandeja branca. As raízes vivas

e as mortas de cada espécie foram classificadas visualmente com base nas características morfológicas, coloração, flexibilidade e quantidade de bifurcações. As raízes vivas apresentavam boa flexibilidade com leve pressão e aparência transparente; as raízes mortas eram quebradiças e de cor opaca. Para facilitar a separação das raízes de cada espécie usou-se como referência raízes coletadas em plantios monoespecíficos ou próximas a árvore adulta da espécie correspondente. As características das raízes finas de cada espécie foram observadas e anotadas, as quais foram usadas como referências para diminuir os erros de observação, o que diminuiu o grau de subjetividade durante a separação das amostras de raízes das espécies nos consórcios. As raízes de *E. grandis* foram identificadas por apresentarem maior quantidade de bifurcações do que as raízes das leguminosas, coloração marrom claro e diâmetro médio $< 3\text{mm}$. As raízes da *A. mangium* apresentaram coloração amarela claro, quase translúcida e diâmetro médio > 1 e $< 3\text{ mm}$. Após a separação das raízes finas de cada espécie, elas foram secas a 65°C até massa constante e a biomassa seca radicular obtida através da pesagem em balança analítica (precisão de $0,0001\text{g}$).

3.3.3 Biomassa de nódulos

A quantificação da biomassa de nódulos da *A. mangium* foi realizada concomitante às etapas de determinação do desenvolvimento de raízes finas. Foi feita por meio da separação visual dos nódulos, secagem a 65°C até massa constante e pesagem em balança analítica (precisão $0,0001$).

3.4 Análise estatística

Os coeficientes de correlação de Pearson foram calculados pelo SAS utilizando o procedimento PROC COR. A homogeneidade de variância foi testada para cada idade por meio do teste de Levenes. Os valores originais foram transformados logaritmicamente (log) quando as variâncias foram desproporcionais. Diferenças entre os tratamentos foram testadas usando ANAVA (SAS, 1998). O nível de significância foi de $P < 0,05$. Quando a ANAVA indicou efeito significativo dos tratamentos, as médias foram comparadas pelo teste de comparação múltipla de Newman Keuls

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Crescimento da parte aérea

O *E. grandis* cresceu em altura de forma semelhante nos tratamentos 0A:100E e 50A:100E (Figura 3 A). A altura da *A. mangium* foi menor do que o *E. grandis* desde os primeiros meses pós-plantio. Até 17 meses pós-plantio, não houve diferença entre a altura da *A. mangium* nos tratamentos 100A:0E e 50A:100E. Um ano depois, a *A. mangium* no tratamento 100A:0E apresentou maior crescimento em altura do que no tratamento 50A:100E. O *E. grandis* no tratamento 0A:100E não diferiu do *E. grandis* no tratamento 50A:100E em todas as idades.

Aos 12 meses pós-plantio, a área basal da *A. mangium* no tratamento 50A:100E foi semelhante ao *E. grandis* no mesmo tratamento e ao *E. grandis* no 0A:100E (Figura 3 B). Após essa idade, até 29 meses, diminuiu consideravelmente, ficando menor do que sua área basal em 100A:0E e do que a do *E. grandis* em 0A:100E e 50A:100E. A área basal da *A. mangium* em 100A:0E foi semelhante ao *E. grandis* em 0A:100E e 50A:100E.

Quanto à biomassa total, durante os 30 meses de avaliação, não houve diferença entre o *E. grandis* em 0A:100E e 50A:100E (Figura 3 C). Após seis meses, a *A. mangium* em 100A:0E apresentou produção de biomassa menor do que a do *E. grandis*, porém quase dez vezes maior do que a biomassa obtida em 50A:100E.

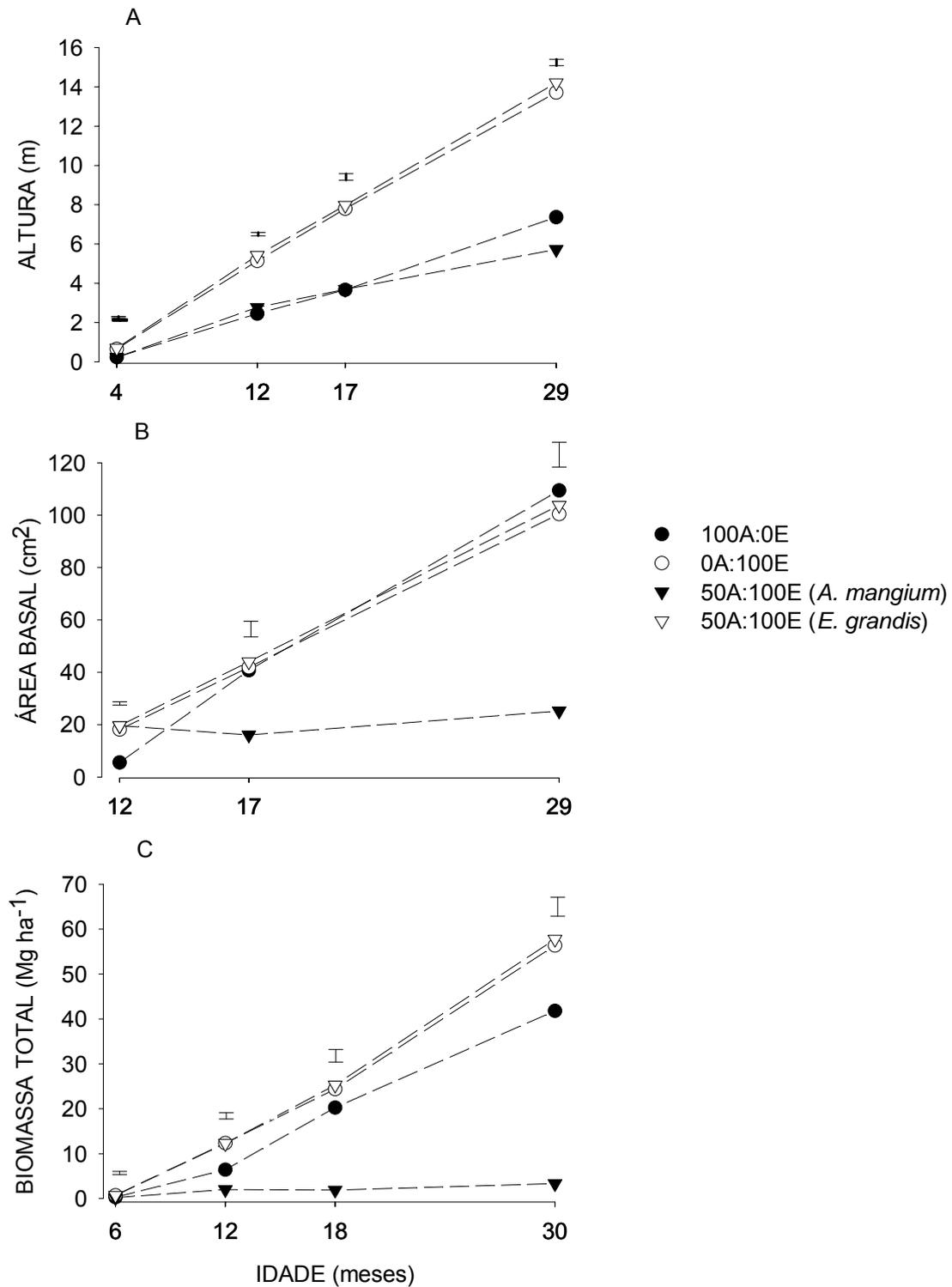


Figura 3 - Crescimento em altura (A), área basal (B) e biomassa total das árvores nos diferentes tratamentos. As barras indicam a ocorrência de diferença mínima significativa pelo teste de Student-Newman-Keuls ($P < 0,05$). Não havendo barra, o efeito não foi significativo

Nos povoamentos monoespecíficos e misto, quando houve alta competição por luz, a competição radicular por água e nutrientes também foi alta. Durante todo o período de amostragem, o *E. grandis* no povoamento misto não apresentou diminuição do crescimento em altura e área basal relativamente ao povoamento monoespecífico (0A:100E). Resultados semelhantes foram obtidos por Coelho et al. (2007). A *A. mangium* mostrou-se muito sensível à competição com o *E. grandis*. Em 50A:100E, a competição interespecífica fez com que as árvores de *A. mangium* apresentassem aumento do crescimento aéreo e diminuição do crescimento radicular. Laclau et al. (2007), que avaliaram a dinâmica de acumulação de biomassa nos compartimentos das árvores nesse experimento, verificaram que a competição entre as espécies para interceptar luz ocorreu desde o primeiro ano de crescimento. A *A. mangium* ajustou-se estruturalmente a esse efeito por meio de maior alocação de fotoassimilados para crescimento em altura, com objetivo de manter sua posição no dossel por maior tempo. Conseqüentemente, houve diminuição de seus incrementos em área basal e crescimento radicular. O mesmo foi observado em povoamentos mistos de *E. globulus* e *A. mearnsii* (FORRESTER et al., 2004).

No tratamento misto houve estratificação do dossel (Figura 3). As árvores de *E. grandis* formaram um estrato dominante e as árvores de *A. mangium* formaram um estrato co-dominado. A capacidade de estratificação da copa é uma característica essencial para o sucesso de povoamentos mistos (KHANNA, 1997; BAUHUS et al., 2000; FORRESTER et al., 2004, COELHO et al., 2007). Assim, com o rápido crescimento da espécie intolerante à sombra forma-se uma copa dominante sobre a espécie tolerante à sombra, formando um estrato co-dominante ou dominado. Essa adaptação estrutural de copas pode aumentar a captação de luz e a sua eficiência de uso no estrato dominante (FORRESTER et al. 2005). Binkley et al. (1992) constataram no Hawaii que no povoamento misto de *E. saligna* e *Albizia falcataria* houve maior interceptação e eficiência de uso da luz. O *E. saligna* usou mais eficientemente os nutrientes do que a *A. falcataria*, porém esta acelerou a ciclagem biogeoquímica de nutrientes. Bauhus et al. (2000), verificaram que acima do solo as árvores de *E. globulus* e *A. mearnsii* interagiram sinérgicamente, explicado principalmente pelos

mecanismos de desenvolvimento abaixo das árvores dominantes e pela estratificação da copa entre as espécies, o que diminui a competição interespecífica.

A Figura 4 apresenta o desenvolvimento aéreo dos tratamentos 100A:0E, 0A:100E e 50A:100E nas idades de 6, 12 e 30 meses.

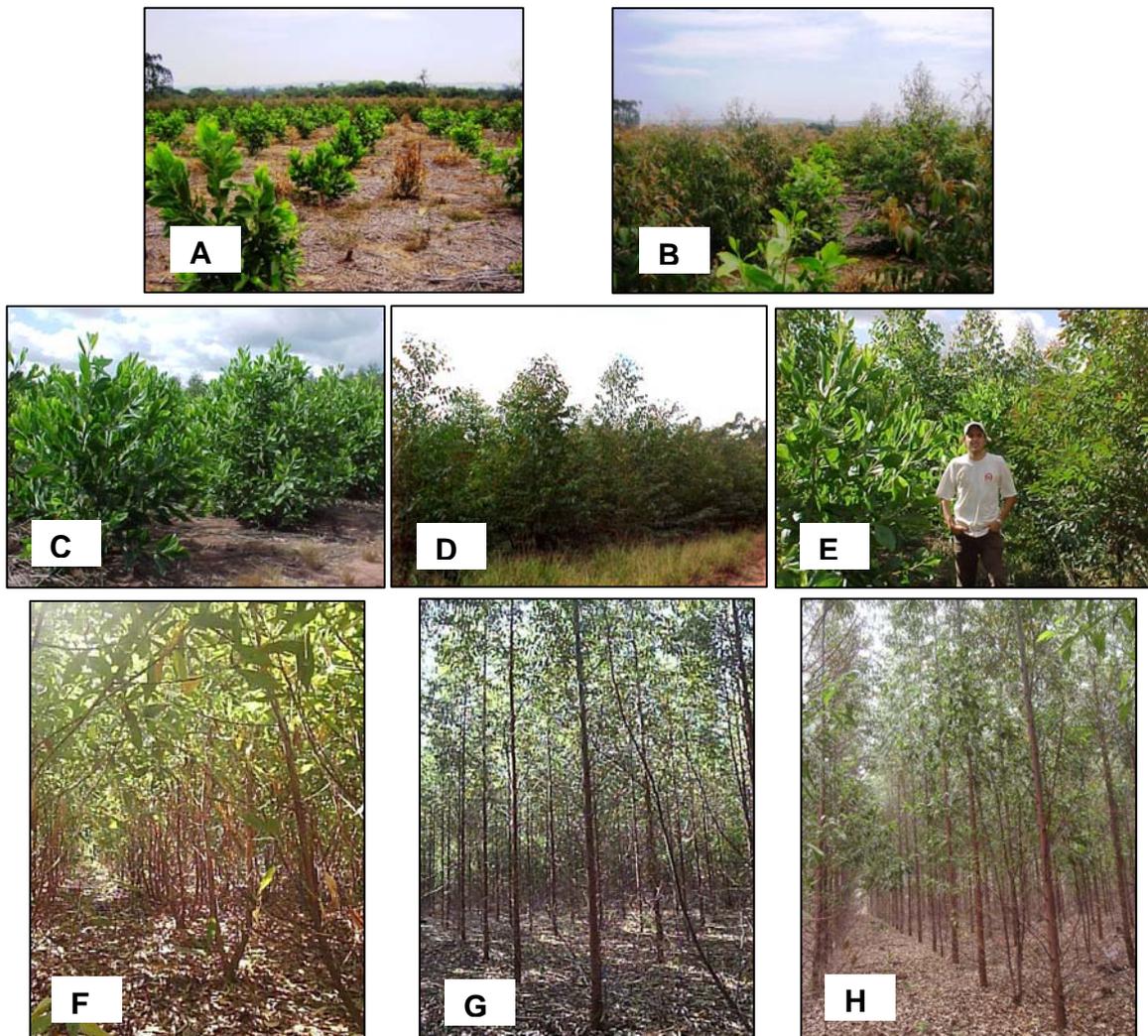


Figura 4 - Desenvolvimento dos tratamentos em diferentes idades. Tratamentos 100A:0E e 50A:100E aos 7 meses (A e B); 100A:0E, 0A:100E e 50A:100E aos 12 meses (C, D e E); 100A:0E, 0A:100E e 50A:100E aos 30 meses (F, G e H)

4.2 Desenvolvimento de raiz fina nas camadas do solo

Comparando-se a dinâmica de exploração do solo pelas raízes finas nos tratamentos monoespecíficos (100A:0E e 0A:100E) com o tratamento misto 50A:100E,

constata-se que as duas espécies apresentaram relação de competição intra e interespecífica por recursos de crescimento (água e nutrientes) (Figura 5). Aos seis meses de idade, a drf não diferiu entre as espécies plantadas à mesma densidade de plantio, com exceção na camada 10-30 cm em que a drf do tratamento 100A:0E foi menor (Figura 5 A). Nessa idade, seria prematura qualquer afirmação sobre diferenças entre as espécies quanto ao desenvolvimento radicular, pois os recursos destinados ao crescimento das árvores (luz, água e nutrientes) ainda não eram limitantes.

Seis meses depois, houve considerável aumento da drf até 30 cm de profundidade nos tratamentos monoespecíficos e para o *E. grandis* em 50A:100E (Figura 5 B). As raízes finas do *E. grandis* apresentaram maior desenvolvimento na camada superficial (0-10 cm), com destaque em 0A:100E. A *A. mangium* em 50A:100E, até essa idade cresceu sem restrição de recursos ambientais. Aos 6 e 12 meses pós-plantio, sua drf em 50A:100E foi cerca de metade da drf em 100A:0E, o que está diretamente correlacionado com a densidade de plantio.

Na camada superficial do solo foi nítida a diferença entre a drf da *A. mangium* e do *E. grandis* (Figura 5 B e C). A *A. mangium* no tratamento monoespecífico apresentou menores valores de drf até 18 meses pós-plantio, caracterizando crescimento radicular lento. Isso indica baixa capacidade da *A. mangium* de competir por água e nutrientes com o *E. grandis*. Dados apresentados por Coelho et al., (2007), obtidos na mesma estação experimental, também mostraram o menor desenvolvimento aéreo e radicular da *A. mangium* em relação ao *E. grandis*. Parte desse menor desenvolvimento relativo da *A. mangium* em relação ao *E. grandis* pode ser atribuído ao efeito sazonal do período seco e frio que ocorre no meio do ano em Itatinga, adverso às condições ótimas ecologicamente para essa espécie (BOUILLET et al. 2007), e ao menor grau de melhoramento dessa leguminosa.

Aos 18 meses, nos povoamentos monoespecíficos e para o *E. grandis* no povoamento misto, a drf foi maior na camada 0-10 cm e houve maior exploração radicular nas camadas subsuperficiais (Figura 5 C). Nessa idade, na superfície do solo, aumentou a diferença da drf do *E. grandis* no povoamento monoespecífico e misto, e para a *A. mangium* no tratamento monoespecífico. Entre 100 e 200 cm de profundidade, a drf do *E. grandis* foi superior ao da *A. mangium*, o que constitui mais

uma evidência da vantagem competitiva do *E. grandis* sobre a *A. mangium*. Segundo Nepstad et al. (1994), as raízes finas nas camadas mais profundas são essenciais para o suprimento de água às árvores, especialmente em florestas tropicais que apresentam estações secas bem definidas. A menor diferença entre o tratamento 0A:100E e o 50A:100E para o *E. grandis* é uma consequência da menor intensidade de interação positiva e da maior ocorrência da competição intra e interespecífica. Apesar de em 50A:100E a *A. mangium* possuir metade da densidade de árvores, ela demonstra estar sob intensa competição interespecífica com o *E. grandis*. Isso é justificado pelo aumento das diferenças de drf entre o *E. grandis* e a *A. mangium* neste tratamento.

Na camada superficial do solo, aos 12 e 18 meses, a drf do *E. grandis* no povoamento misto foi menor do que no povoamento monoespecífico (Figura 5 B e C), apesar de não diferirem quanto ao crescimento em altura, área basal e biomassa total (Figura 3). Isso pode ser decorrente de interações positivas do consórcio (VANDERMEER, 1989; KELTY; CAMERON, 1995). Segundo Forrester et. al. (2004), quando as interações positivas são dominantes, os povoamentos mistos são mais produtivos do que os monoespecíficos.

Aos 30 meses, na camada 0-10 cm, os tratamentos 100A:0E, 0A:100E e o *E. grandis* em 50A:100E não apresentaram mais diferenças na drf (Figura 5 D). A drf de *A. mangium* em 50A:100E foi muito baixa em todo o perfil de solo. Entre 18 e 30 meses, houve diminuição da drf para o *E. grandis*, tanto em 0A:100E quanto em 50A:100E. Como a diminuição na drf ocorreu simultaneamente para os dois tratamentos, a causa provável pode ter decorrido do efeito climático da variabilidade interanual do clima da região em novembro (Figura 1). Outra possível explicação é que a drf acompanha o desenvolvimento foliar (MELLO et al., 2004; LACLAU et al., 2007). Até o fechamento das copas (aproximadamente 18 meses) a área foliar atingiu o máximo. Após esta idade, decorrente da maior competição por luz, ocorreu diminuição da área foliar (LACLAU et al., 2007).

A diminuição da drf da *A. mangium* no povoamento misto com o tempo é uma consequência da competição e domínio do *E. grandis*. O efeito da competição com o *E. grandis* foi mais intenso aos 12 e 18 meses (época seca e fria). Aos 30 meses pós-plantio, apesar de a variação climática ter provocado a diminuição da umidade no solo,

a competição intra-específica e interespecífica continuou em níveis elevados. Aos 18 meses, na camada 0-10 cm, a quantidade de raízes de *A. mangium* foi pequena e bem maior na camada 10-30 cm (Figura 5 C). Entre 18 e 30 meses, a *A. mangium* no tratamento 50A:100E mostrou semelhante comportamento em relação ao período anterior. Porém, o efeito da competição com o *E. grandis* induziu a *A. mangium* a aprofundar seu sistema radicular, sendo a maior drf encontrada na camada 30-50 cm. Quando a competição radicular na camada 0-10 cm foi menor (18 meses), maior foi a drf da *A. mangium* próximo à superfície. Doze meses depois, com o acirramento da competição entre as espécies, a *A. mangium* buscou maior exploração radicular em subsuperfície. Coelho et al. (2007) encontraram resultados semelhantes em povoamentos mistos de *E. grandis* com *A. mangium* e outras leguminosas nativas.

Não houve clara estratificação do sistema radicular devida a características intrínsecas das espécies. O *E. grandis* e a *A. mangium* ocuparam o mesmo nicho de exploração radicular por água e nutrientes no solo durante os primeiros meses de crescimento. Diferiram apenas na capacidade competitiva. Essa semelhança na exploração radicular é negativa para a produtividade em povoamentos mistos, pois não permite acessar a novos recursos no solo indisponíveis para os povoamentos monoespecíficos. Bauhus et. al. (2000) também verificaram que as raízes finas do *E. globulus* e da *A. mearnsii* exploraram as mesmas camadas do solo, bem como apresentaram similar longevidade e alocação de C para o crescimento radicular. Segundo eles, esses efeitos intensificaram a competição entre as espécies consorciadas. Ao contrário, Neave e Florença (1994) encontraram diferenças de exploração vertical do solo por raízes finas em povoamentos mistos de *E. maculata*, *E. pilularis* e *Acacia mabellae*. O *E. maculata* apresentou maior biomassa de raízes finas nas camadas mais profundas do solo do que as demais espécies, mostrando-se mais eficiente na aquisição de nutrientes nas camadas mais profundas e maior capacidade competitiva durante períodos de menor disponibilidade de água no solo. Mas isso poderia ser resultado também da competição entre o eucalipto e a acácia. Resultando na dificuldade da leguminosa em não conseguir desenvolver suas raízes nas camadas superficiais. O estudo da dinâmica das raízes durante o crescimento é a comparação

com povoamentos monoespecíficos, sendo estes necessários para compreender a origem das diferenças de exploração do solo pelas espécies consorciadas.

As perdas por lixiviação de nutrientes em povoamentos monoespecíficos de eucaliptos são baixas, devido à elevada exploração radicular nas camadas superficiais do solo (BOUILLET et al., 2002, LACLAU et al., 2003). Desta forma, no povoamento misto, a absorção de nutrientes da *A. mangium* é dificultada.

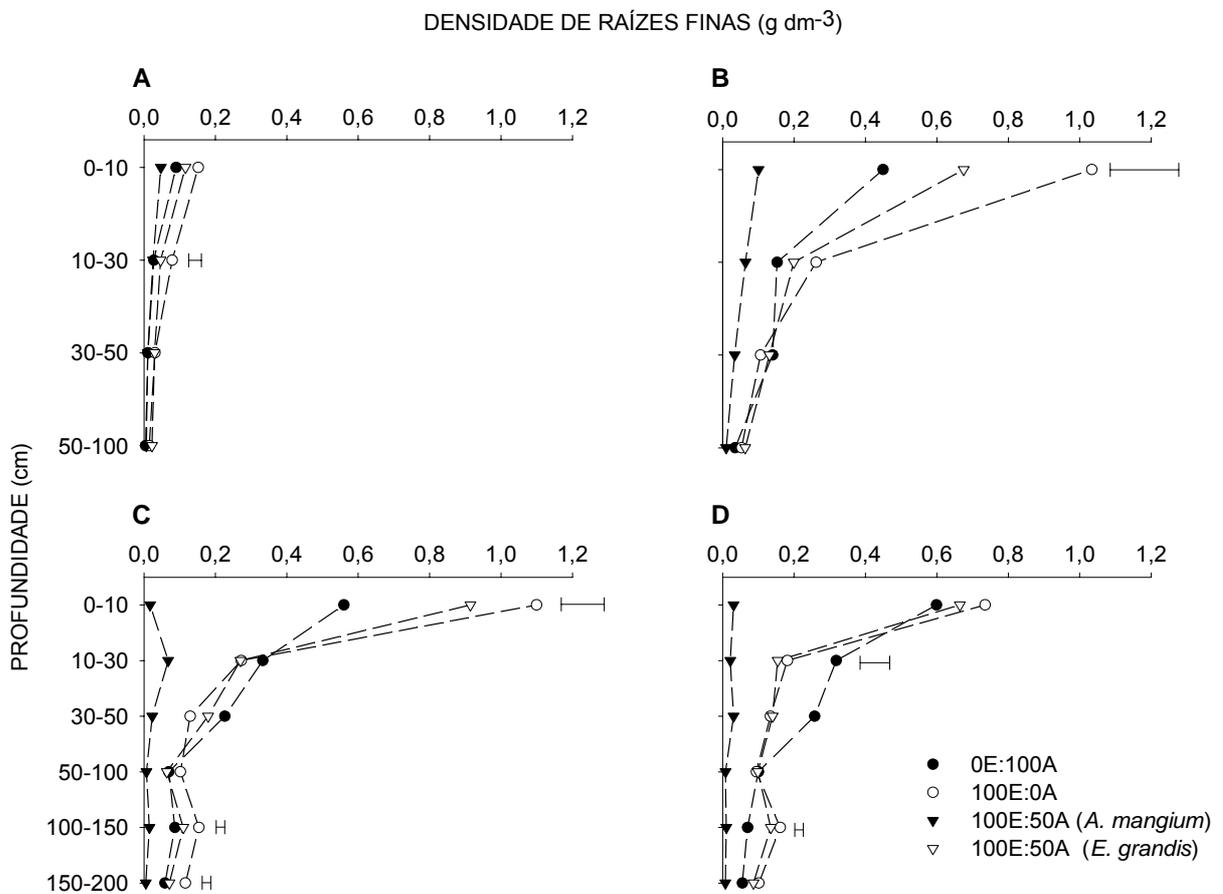


Figura 5 - Densidade de raízes finas aos 6 meses após a instalação do experimento (A), 12 meses (B), 18 meses (C) e aos 30 meses (D). As barras indicam a ocorrência de diferença mínima significativa pelo teste de Student-Newman-Keuls ($P < 0,05$). Não havendo barra, o efeito não foi significativo

4.3 Desenvolvimento de raiz fina em função da idade

A *A. mangium*, no tratamento 100A:0E, apresentou maior drf na camada superficial do solo (0-10 cm) (Figura 6 A). Com o tempo, aumentou a exploração radicular em superfície e nas camadas subsuperficiais. Aos 12 meses, na camada superficial (0-10), a drf foi quase cinco vezes maior do que aos 6 meses, não mudando significativamente até os 30 meses. Abaixo dessa camada, as diferenças entre 6 e 12 meses foram menores. Entre 18 e 30 meses pós-plantio, não houve aumento significativo na exploração radicular em todo o perfil do solo.

A diminuição da drf da *A. mangium* em profundidade não foi tão abrupta quando a do *E. grandis* (Figura 6 B). Para o *E. grandis*, no tratamento 0A:100E, a exploração da camada 0-10 cm foi maior até os 12 meses. Depois dessa idade, não houve mudanças significativas. A exploração subsuperficial por parte das raízes finas do *E. grandis* aumentou com o crescimento das árvores. Na camada 30-50 cm, a drf aos 12, 18 e 30 meses foram diferentes da drf aos 6 meses. Na camada 50-100 cm, a drf até 12 meses não aumentou significativamente, sendo esta duas vezes maior aos 18 meses do que o período anterior.

Em 50A:100E, após 12 meses de idade, ocorreu inibição do desenvolvimento radicular da *A. mangium* em todo perfil do solo, sendo grande a competição interespecífica (Figura 6 C). A drf aos 12 meses foi maior que aos 18 e 30 meses. A drf do *E. grandis* na camada 0-10 cm aos 12 meses foi quase seis vezes maior do que a idade anterior (Figura 6 D). Na camada 10-30 cm, a drf desta espécie foi maior aos 18 meses. Subjacente a essa camada, até 100 cm de profundidade, aumentou a drf aos 12 meses. Entre 12 e 30 meses, o aumento na drf não foi significativo. Contudo, o *E. grandis* apresentou expressiva exploração radicular nos horizontes subsuperficiais, com pouca variação da drf entre 30 e 200 cm de profundidade aos 18 e 30 meses.

A drf de povoamentos de eucaliptos e acácias foi muito sensível à disponibilidade de água no solo. O *E. grandis* apresentou diminuição no desenvolvimento de raízes finas na superfície do solo. Tentando compensar a falta de água na superfície, ele aumentou a exploração de raízes nas camadas subsuperficiais, onde a disponibilidade de água era maior. Mello (2004), em uma região com clima semelhante ao deste

estudo, verificou que a drf do *E. grandis* foi muito sensível às variações de umidade na camada superficial do solo. Akinnifesi et al. (1999), Pregitzer et al. (1997), Anderson et al. (2003) e Caldwell et al. (2005), estudando a dinâmica de raízes finas de espécies sob competição e estresse hídrico, constataram forte influência da umidade do solo na drf do *E. grandis*.

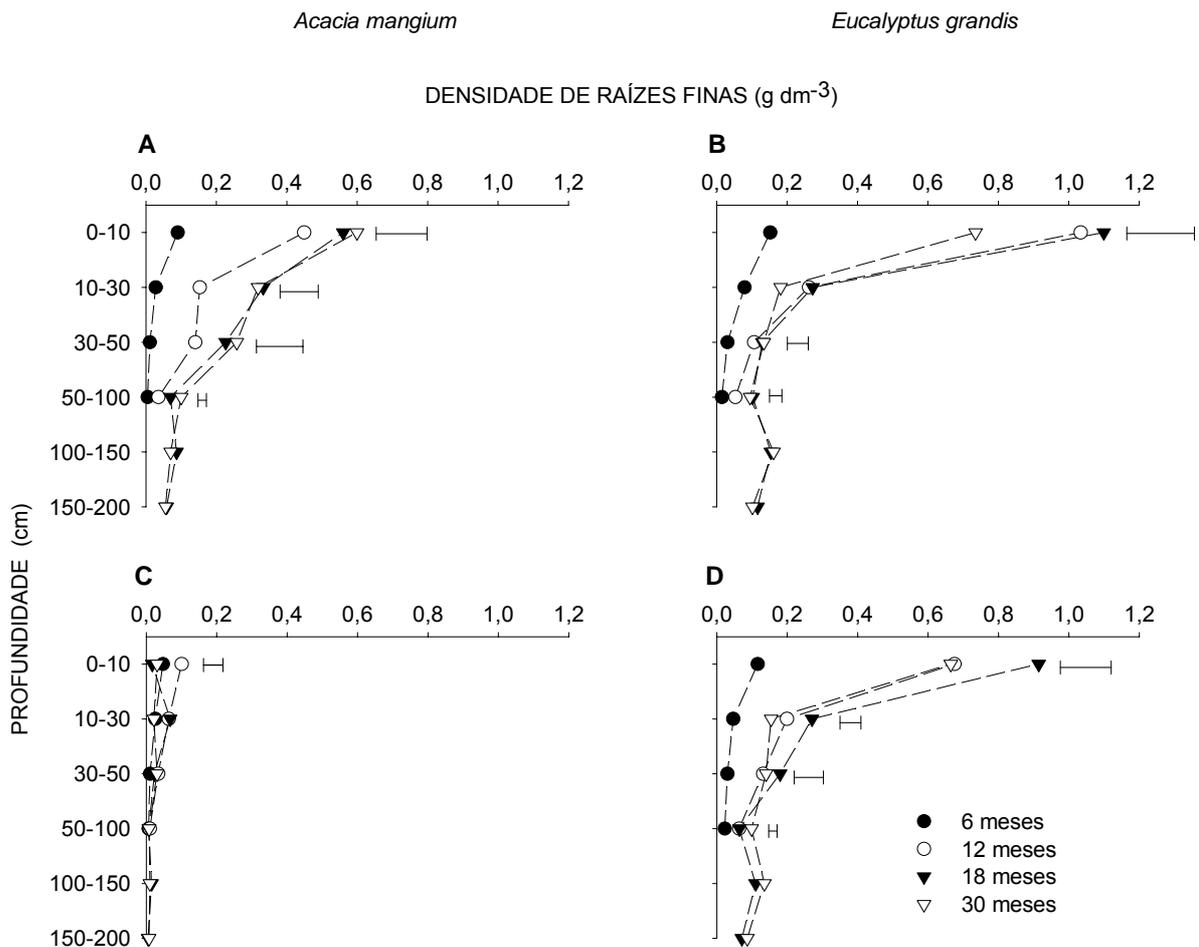


Figura 6 - Densidade de raízes finas no tratamento 100A:0E (A), 0A:100E (B), 50A:100E raízes de *A. mangium* (C) e 50A:100E raízes de *E. grandis* (D). As barras indicam a ocorrência de diferença mínima significativa pelo teste de Student-Newman-Keuls ($P < 0,05$). Não havendo barra, o efeito não foi significativo

4.4 Desenvolvimento de raízes finas em relação à posição de amostragem

4.4.1 Próximo à árvore

No tratamento 100A:0E, a *A. mangium* apresentou drf quase cinco vezes maior entre 6 e 12 meses na camada superficial do solo (0-10 cm), aumentando significativamente sua exploração radicular até 30 meses (Posição 1, Figura 7 A). Na camada 50-100 cm, o aumento da drf ocorreu a partir dos 18 meses. O *E. grandis* no tratamento 0A:100E apresentou maior de drf na camada 0-10 cm aos 18 meses e na camada 50-100 cm, a drf aumentou após 12 meses pós-plantio (Posição 1, Figura 7 D). Aos 30 meses, no verão, a disponibilidade de água no solo era excepcionalmente baixa na época de amostragem de raízes. Contudo, a competição intra-específica nos tratamentos monoespecíficos e a competição intra e interespecífica no tratamento misto manteve-se elevada. Próximo à árvore, no tratamento monoespecífico, a *A. mangium* pouco sentiu o efeito da competição intra-específica e a baixa disponibilidade de água e nutrientes (Posição 1, Figura 7 A). Ela só apresentou sinais de diminuição na drf nas posições extremas de amostragem, meio da linha e meio da entrelinha, onde era provavelmente maior a competição por água e nutrientes. Em relação ao *E. grandis* monoespecífico, seu desenvolvimento radicular próximo à árvore mostrou que a espécie se desenvolveu sem grande influência do efeito da competição. Porém, quando ocorreu a redução da umidade no solo, aos 30 meses, esta espécie diminuiu o desenvolvimento radicular (Posição 1, Figura 7 D).

Em 50A:100E, a competição intra e interespecífica foi ainda maior, devido ao aumento do número de árvores por hectare. Nesse tratamento, próximo à árvore de *A. mangium*, a drf da espécie foi equivalente aos valores médios de todas as idades em todas as camadas (Posição 4, Figura 8 A). Entretanto, aos 18 meses, houve diminuição da drf na camada 0-10cm com aumento na camada 10-30 cm. Aos 30 meses, a drf aumentou na camada 30-50 cm. Na mesma posição de amostragem, a drf do *E. grandis* foi maior na camada 0-10 cm, diminuindo com o aumento da profundidade (Figura 8 B). Na maioria das camadas, aos 18 meses a drf foi maior devido à diminuição da drf aos 30 meses. Próximo às árvores de *E. grandis*, a drf na camada 0-10 cm foi maior aos 18

meses pós-plantio (Posição 1, Figura 8 D). Entre 50 e 100 cm, a maior drf foi encontrada aos 30 meses. Próximo à árvore de *E. grandis*, as raízes finas de *A. mangium* desenvolveram-se com baixa competição intra e interespecífica até 12 meses pós-plantio (Posição 4, Figura 8 C). A partir desta idade, aumentou a competição radicular por água e nutrientes, o que causou a diminuição da drf nas camadas superficiais. Apesar da menor disponibilidade de água no solo aos 30 meses, a competição intra e interespecífica continuaram elevadas, fazendo com que as espécies diminuíssem a exploração radicular na camada superficial, aumentando-a nas camadas subsuperficiais, onde a disponibilidade de água era maior.

Tanto a *A. mangium* quanto o *E. grandis* apresentaram maior drf próximo à árvore, nos povoamentos monoespecíficos (Posição 1) e mistos (Posições 1 e 4) (Figura 7 A, D, 8 A e D). A maior drf próximo à árvore pode ser uma consequência da maior disponibilidade de água e nutrientes ocasionada pelo escoamento da água da chuva pelo tronco e por ser menor a competição intra e interespecífica nessa posição. Nas posições mais distantes da árvore a competição intra e interespecífica foi maior, resultando em diminuição da drf. Estes efeitos tendem a desaparecer com a idade do povoamento, porém com tendência de maior crescimento radicular próximo ao tronco (BALDWILL; STEWART, 1987; LACLAU et al., 2001; BOUILLET et al., 2002). Em povoamentos jovens, a distribuição horizontal de raízes está fortemente condicionada às práticas de manejo (MELLO, 1997). Leles (1995) observou em povoamentos de *E. camaldulensis* e *E. pellita*, aos 52 meses, que aumentou a competição intra-específica com a diminuição do espaçamento de plantio, e as raízes se concentraram mais próximo à árvore.

Segundo Mello (1997), a distribuição de raízes na superfície do solo também pode ser influenciada pelo tipo e intensidade de precipitação pluvial. Assim, a copa e o volume de troncos de árvores adultas são importantes interceptadores e condutores de água pluvial. Em povoamentos de *E. grandis* a interceptação de água pluvial pelas copas foi de 11% (SOARES; ALMEIDA, 2001). Este processo é fortemente dependente da área foliar e do volume de chuvas ao longo do ano (DYE, 1996). Laclau et al. (2005) observou em plantações clonais de *Eucalyptus alba* aos 6 anos de idade que a quantidade de água pluvial que escorre pelo tronco correspondeu aproximadamente a

1% da precipitação anual, em uma densidade de 530 árvores por hectares. Em povoamentos portugueses de *E. globulus* o escoamento pelo tronco foi de aproximadamente 2% da precipitação anual (CORTEZ, 1996). A proporção do escoamento pelo tronco pode ser muito mais alta em outras florestas, representando, por exemplo, 14 a 20% da precipitação em povoamentos de *Fagus sylvatica* (KOCH; MATZNER, 1993).

4.4.2 Meio da entrelinha e da linha de plantio

No meio da entrelinha do tratamento 100A:0E, não houve diferença entre as idades na camada 0-10 cm (Posição 3, Figura 7 B). Na camada subjacente, 10-30 cm, a drf diminuiu aos 30 meses. Abaixo de 30 cm, a drf de 18 e 30 meses foi maior do que aos 6 e 12 meses. Em 0A:100E, até 12 meses, a drf do *E. grandis* na camada 0-10 cm foi quatro vezes maior do que 6 meses, não aumentando após essa idade (Posição 3, Figura 7 E). Nas camadas subsuperficiais, houve aumento da drf aos 30 meses. As raízes finas da *A. mangium* pouco desenvolveram nessa posição em 50A:100E (Posição 7 e 6, Figura 9 A e C). Entre 6 e 12 meses para o *E. grandis*, no meio de sua entrelinha, a drf na camada 0-10 cm foi três vezes maior (Posição 7, Figura 9 D). Após 12 meses não houve aumento na drf. Para o *E. grandis*, no meio da entrelinha da *A. mangium*, camada 0-10cm, a df aos 18 meses foi maior do que as camadas subjacentes. A diferença foi grande aos 30 meses pós-plantio (Posição 6, Figura 9 B).

No meio da linha de plantio do tratamento 100A:0E, a drf da *A. mangium* na camada 0-10 cm diminuiu aos 30 meses, sendo maior aos 18 meses (Posição 2, Figura 7 C). Nas camadas 10-30cm e 30-50 cm, a drf aos 18 e 30 meses foi maior que aos 6 e 12 meses. Na camada 50-100 cm, não houve diferença entre as idades. Em 0A:100E, a DRF do *E. grandis* pouco aumentou após 12 meses, até 100 cm de profundidade (Posição 2, Figura 7 F). No 50A:100E, a DRF da *A. mangium* foi praticamente nula entre duas árvores do *E. grandis* (Posição 16, Figura 8 E). Para o *E. grandis*, na camada 0-10 cm, a drf foi maior aos 18 meses ocorrendo diminuição da drf aos 30 meses (Posição 16, Figura 8 F). Nas outras camadas, a drf foi semelhante entre as idades.

Nas extremidades, meio da entrelinha e meio da linha, a competição intra e interespecífica foi mais elevada do que próximo às árvores, onde a disponibilidade de água e nutrientes era maior. Desta forma, tanto o *E. grandis* como a *A. mangium* diminuíram a drf no meio da entrelinha e no meio da linha. Aos 30 meses pós-plantio, com a diminuição da disponibilidade de água nas camadas superficiais devido a um efeito climático sazonal (Figura 1) e a maior competição intra e interespecífica, o sistema radicular tendeu a se aprofundar.

Em 50A:100E, constatou-se que o desenvolvimento radicular da *A. mangium* ficou restrito à proximidade da árvore. Quando aumentou a distância, foi maior a competição com o *E. grandis*, refletindo em baixo desenvolvimento radicular. O *E. grandis* não apresentou mudanças quanto ao desenvolvimento radicular com ou sem a presença da *A. mangium*.

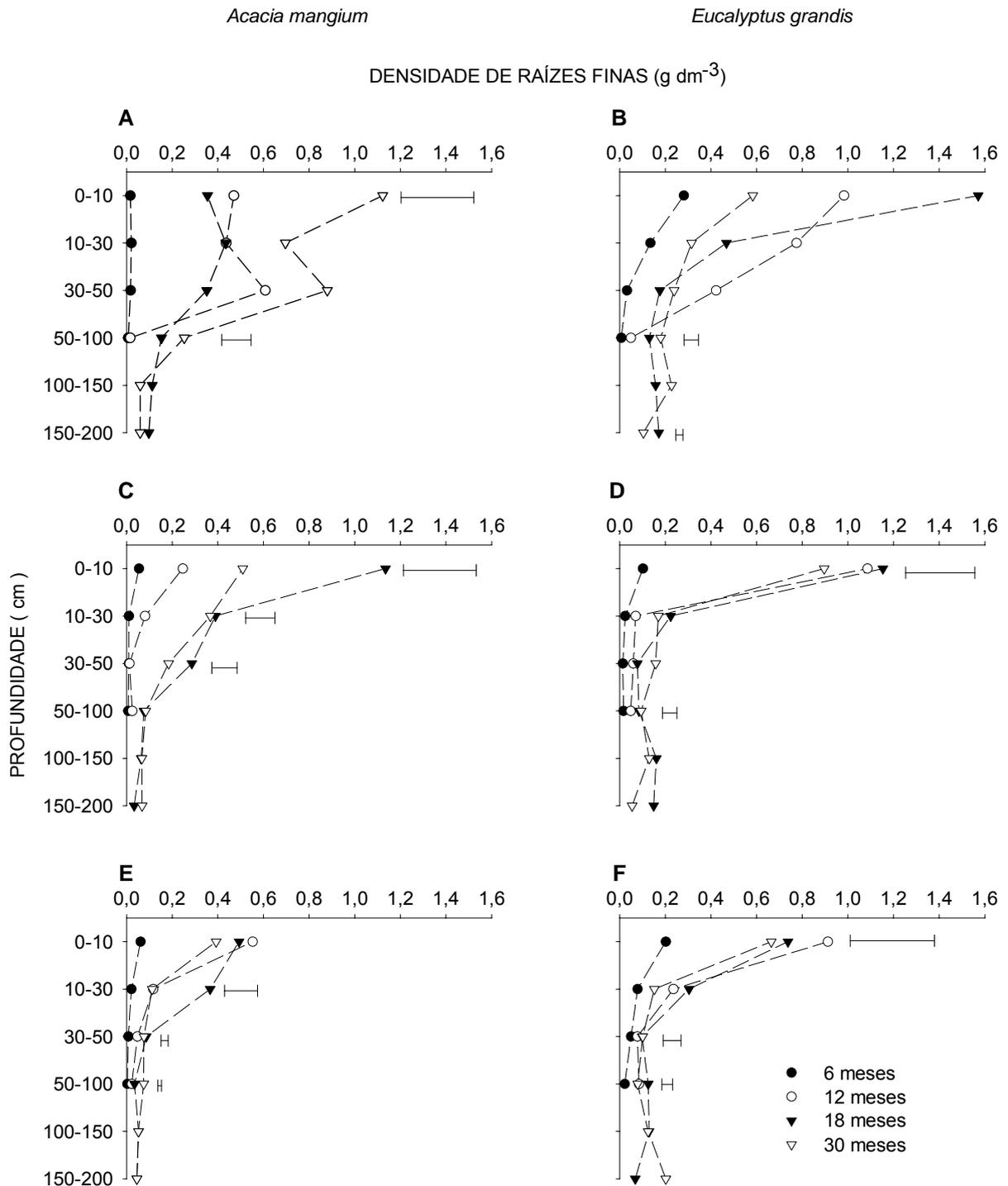


Figura 7 - Densidade de raízes finas em relação à posição de coleta das amostras: Tratamento 100A:0E próximo à árvore (A), 0A:100E próximo à árvore (B), no meio da linha 100A:0E (C), 0A:100E no meio da linha (D), 100A:0E no meio da entrelinha (E) e 100E:0A no meio da entrelinha (F). As barras indicam a ocorrência de diferença mínima significativa pelo teste de Student-Newman-Keuls ($P < 0,05$). Não havendo barra, o efeito não foi significativo

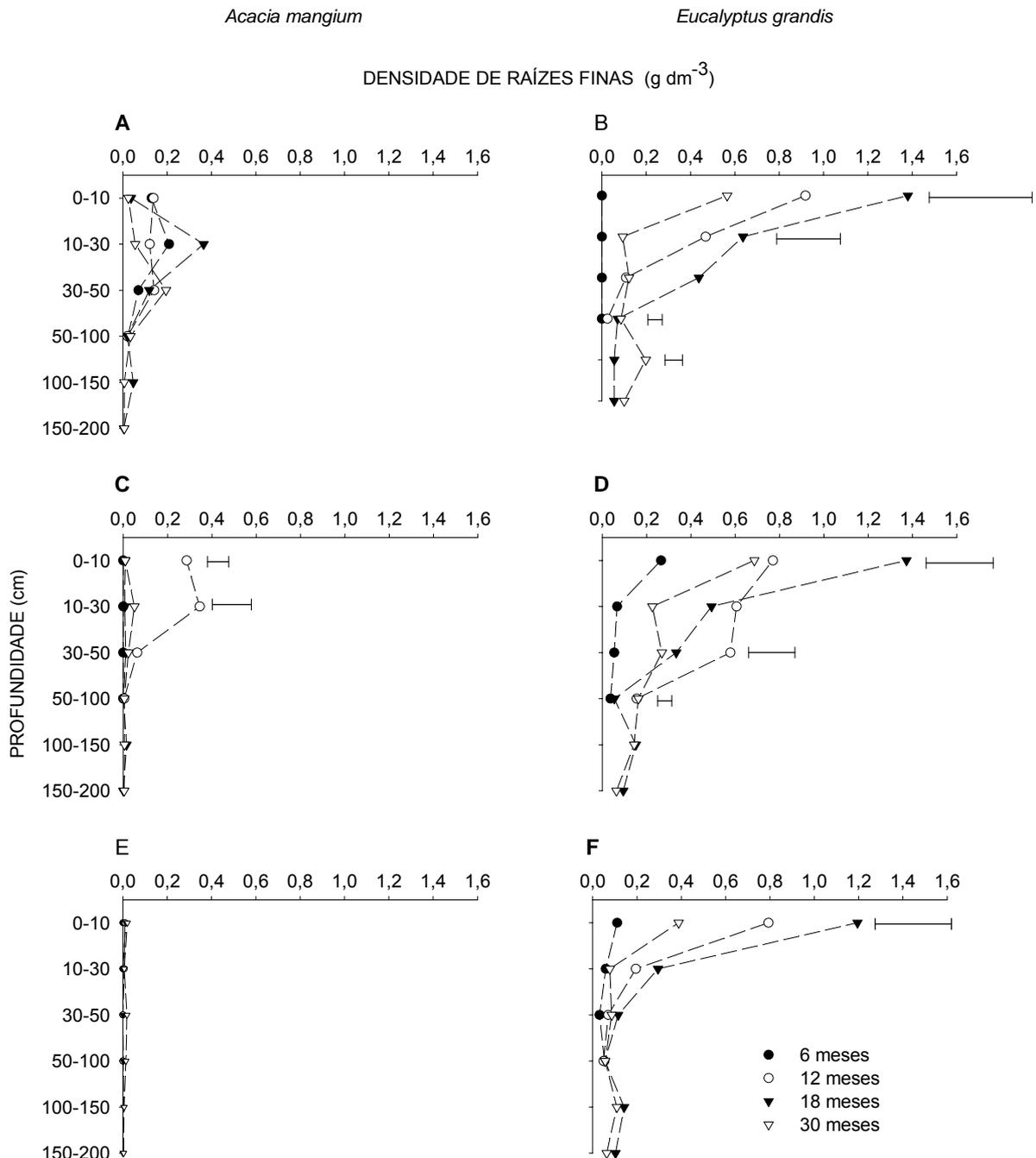


Figura 8 - Densidade de raízes finas em relação à posição de coleta das amostras no tratamento 50A:100E. Sendo raízes de *A. mangium* próximo à *Acacia mangium* (A), raízes de *E. grandis* próximo à *Acacia mangium* (B), raízes de *A. mangium* próximo ao *E. grandis* (C), raízes de *E. grandis* próximo ao *E. grandis* (D), raízes de *A. mangium* no meio da linha do *E. grandis* (E) e raízes de *E. grandis* no meio da linha do *E. grandis* (F). As barras indicam a ocorrência de diferença mínima significativa pelo teste de Student-Newman-Keuls ($P < 0,05$). Não havendo barra, o efeito não foi significativo.

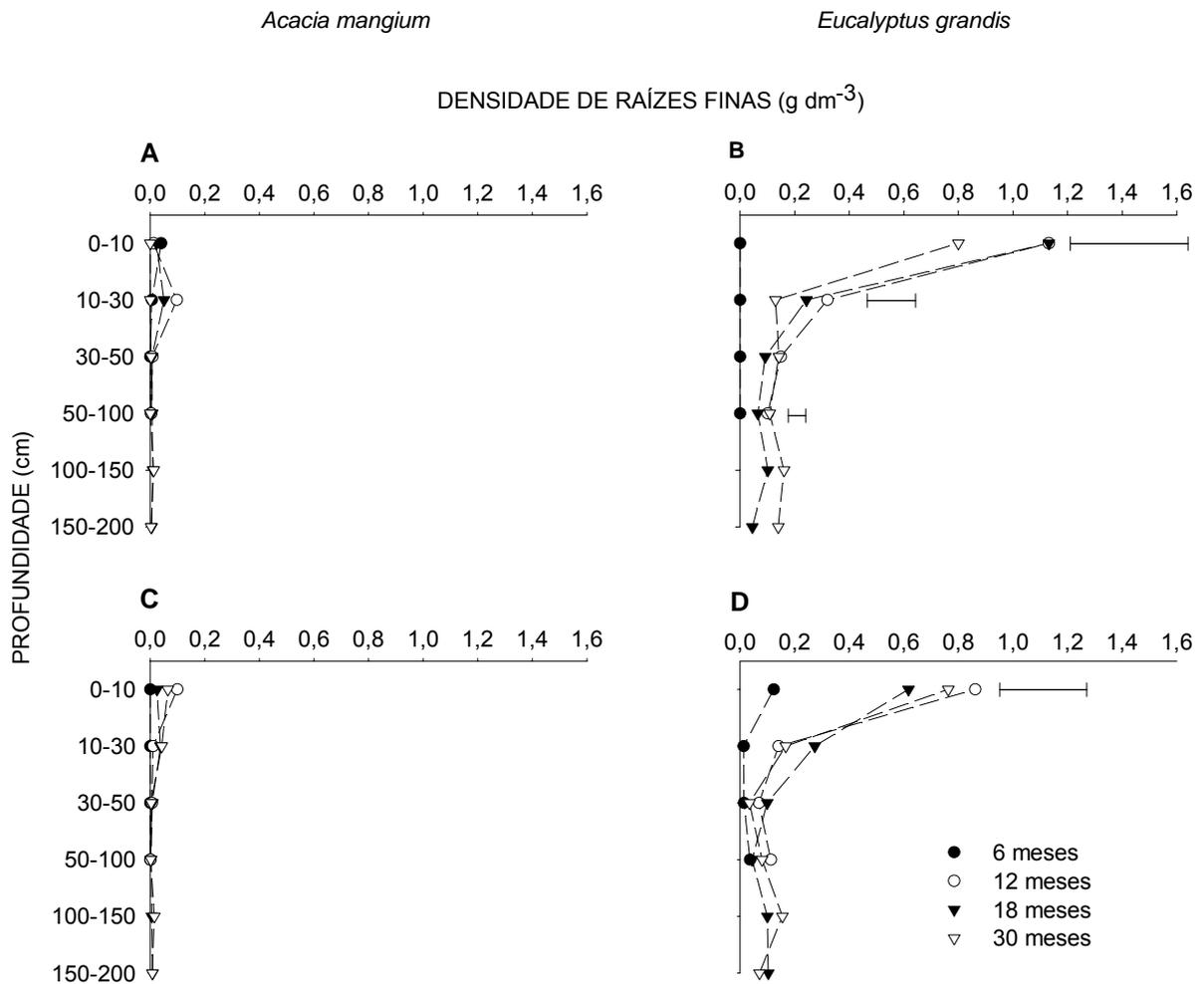


Figura 9 - Densidade de raízes finas em relação à posição de coleta das amostras no tratamento 50A:100E. Sendo raízes de *A. mangium* no meio da entrelinha da *A. mangium* (A), raízes de *E. grandis* no meio da entrelinha da *A. mangium* (B), raízes de *A. mangium* no meio da entrelinha do *E. grandis* (C) e raízes de *E. grandis* no meio da entrelinha do *E. grandis* (D). As barras indicam a ocorrência de diferença mínima significativa pelo teste de Student-Newman-Keuls ($P < 0,05$). Não havendo barra, o efeito não foi significativo

4.5 Biomassa de nódulos

Apesar de a densidade de nódulos ser aproximadamente vinte vezes maior em 100A:0E que em 50A:100E nas duas idades de amostragem, as diferenças não foram significativas por causa da alta variabilidade espacial da densidade de nódulos (Figura 10 A e B). No tratamento 100A:0E, aos 30 meses, ocorreu tendência de maior densidade de nódulos na camada 0-10 cm, diminuindo com o aumento da profundidade (Figura 10 A). No 50A:100E, ocorreu diminuição da densidade de nódulos na camada 10-30 cm e aumento entre 30 e 50 cm (Figura 10 B). Neste tratamento, a mesma tendência foi observada para a drf da *A. mangium*.

Em relação às posições, no tratamento 100A:0E, a maior nodulação aos 18 meses ocorreu na linha de plantio, no meio da distância entre árvores; aos 30 meses, foram encontrados mais nódulos próximos às árvores (Figura 11 A). No tratamento 50A:100E, aos 18 meses, a nodulação foi maior próximo à *A. mangium* (Figura 11 B). Um ano depois, houve acentuada diminuição, com tendência de maior nodulação próximo à *A. mangium*.

Semelhantemente às raízes finas, a grande variabilidade natural de distribuição nódulos está relacionada à variabilidade espacial do solo (Figura 10 e 11). A grande variação sazonal da densidade de nódulos é uma evidência que a interação árvore-microorganismo é muito sensível à baixa umidade no solo (MOREIRA, 2002). A diminuição da nodulação no povoamento misto relativamente ao tratamento mono específico pode ser consequência da maior competição intra e interespecífica. No povoamento mono específico de *A. mangium*, foram encontrados nódulos em todas as posições de coleta, sem tendência de concentração próximo às árvores. No povoamento misto, os nódulos ficaram concentrados na proximidade das árvores, onde ocorreu a maior concentração de raiz fina.

O pH do solo pouco influenciou a nodulação no povoamento mono específico e misto, devido a *A. mangium* apresentar alta produtividade em solos ácidos muito degradados, com alto teor de alumínio trocável (COLE et al., 1996). Martin et al. (2003) verificaram que a capacidade de nodulação do *Alnus rubra* foi maior em solos com pH mais elevado e de menor concentração de NO_3^- . Para eles, não foi significativa a

correlação entre a idade e a capacidade de nodulação. Franco et al. (1994) constataram que a *A. mangium* é uma espécie bem adaptada em solos ácidos.

Nos tratamentos 100A:0E e 50A:100E deste experimento, aos 18 e 30 meses, Bouillet et al. (2007) estimaram a fixação de N₂ por meio de 3 métodos de avaliação (abundância natural de ¹⁵N, diluição isotópica do ¹⁵N e atividade de redução do acetileno - ARA). As maiores concentrações de ¹⁵N foram encontradas nos componentes das árvores de *A. mangium*, provavelmente como resultado da fixação de N₂. Porém, não foram encontradas evidências da transferência de N da *A. mangium* para o *E. grandis*. Os valores da ARA não foram diferentes em 100A:0E e 50A:100E, mas a biomassa de nódulos foi 20-30 vezes mais alta no 100A:0E do que no 50A:100E. Aos 30 meses, a quantidade de N derivado da fixação atmosférica, estimada pelos métodos da abundância natural de ¹⁵N e da diluição isotópica do ¹⁵N, foi de 10 a 20% e 60%, respectivamente. A quantidade de N na biomassa derivada da fixação biológica foi de 62 kg N ha⁻¹ no 100A:0E e 3 kg N ha⁻¹ no 50A:100E pelo método de abundância natural do ¹⁵N, e 16 kg N ha⁻¹ no 50A:100E pelo método de diluição isotópica do ¹⁵N. A quantidade total de N₂ atmosférico fixado desde o plantio (incluindo mortalidade de raízes finas e deposição de serapilheira) foi de 66 kg N ha⁻¹ no 100A:0E e 7 kg N ha⁻¹ no 50A:100E pelo método da abundância natural do ¹⁵N, e 31 kg N ha⁻¹ no 50A:100E pelo método de diluição isotópica do ¹⁵N. Para esses autores, a estimativa mais fidedigna da fixação do N₂ foi obtida pelo método da diluição isotópica do ¹⁵N, quando se amostra todos os componentes das árvores.

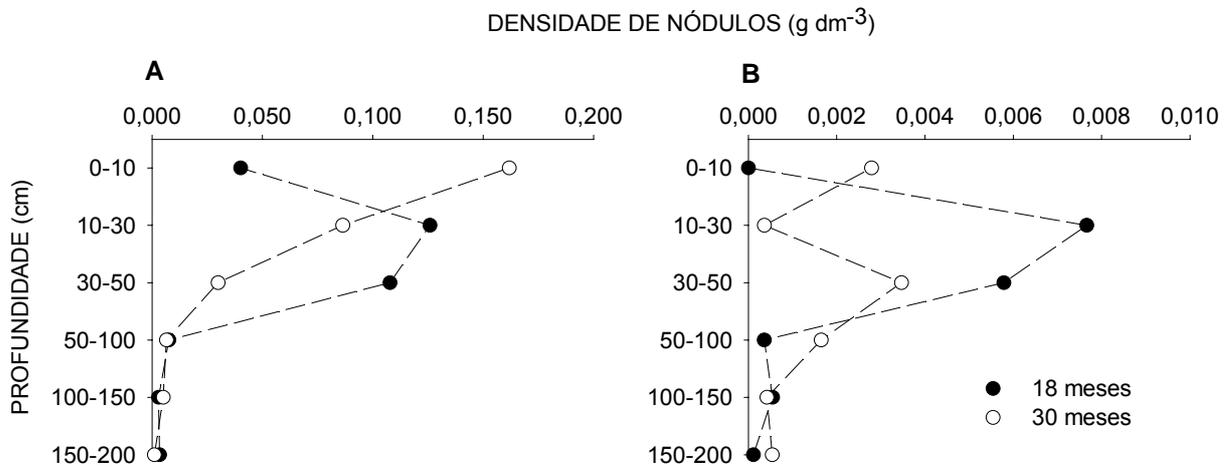


Figura 10 - Densidade de nódulos no perfil do solo do tratamento 100A:0E (A) e do 50A:100E (B). As diferenças entre as idades em cada tratamento não foram significativas, em todas as profundidades amostradas

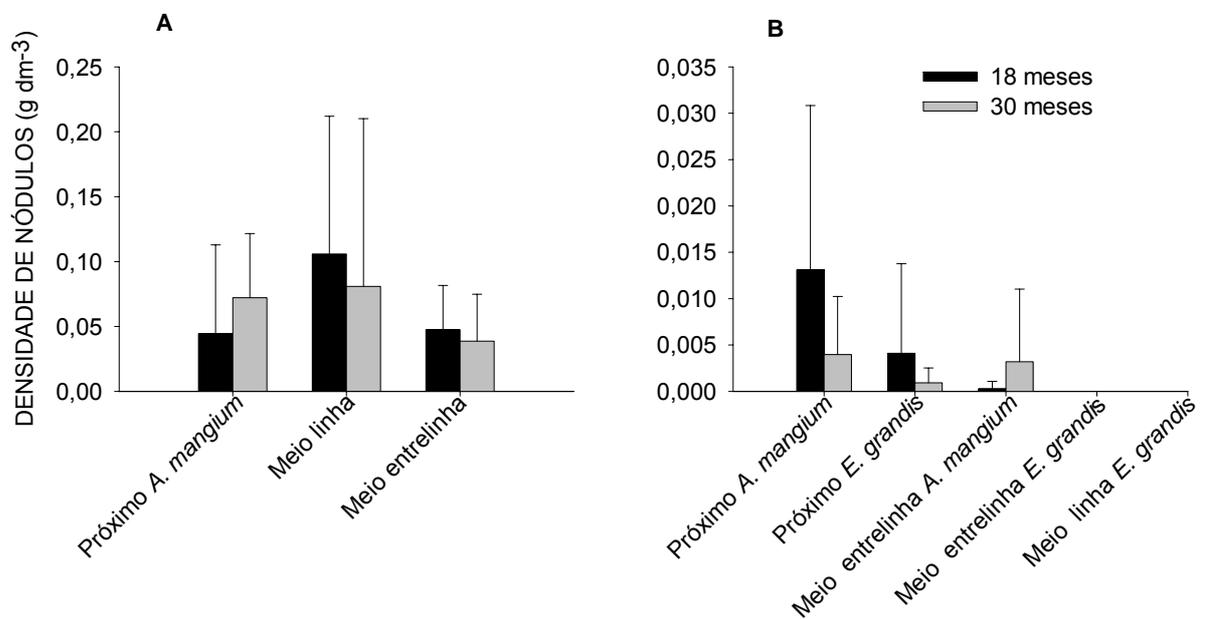


Figura 11 - Densidade de nódulos em diferentes posições de coleta de 0-200 cm de profundidade, sendo o tratamento 100A:0E (A) e o tratamento 50A:100E (B). As barras representam o erro padrão médio das posições

5 CONCLUSÕES

O *E. grandis* apresentou elevado crescimento aéreo, buscando formar um estrato dominante onde a disponibilidade de luz era maior. Da mesma forma, para garantir o vigor do crescimento aéreo, a exploração radicular do solo foi elevada, principalmente na camada superficial onde a disponibilidade de água e nutrientes era maior. Quando houve a diminuição da umidade do solo nas camadas superficiais, a espécie buscou aumentar a exploração radicular em subsuperfície.

Para o *E. grandis*, a competição intra-específica foi maior do que a competição interespecífica, o que resultou na semelhança de desenvolvimento da espécie no tratamento monoespecífico e misto. A competição interespecífica foi mais alta para as árvores de *A. mangium*. Isto fez com que estas árvores, para manter a posição no dossel, crescessem mais em altura do que em diâmetro e ainda alocassem menos carboidratos para a exploração radicular.

Tanto o crescimento aéreo como o radicular da *A. mangium* foi mais lento do que o *E. grandis*, resultando em menor potencial competitivo. Com o aumento da pressão competitiva imposta pelo *E. grandis*, as árvores de *A. mangium* foram dominadas acima e no solo, onde a elevada exploração radicular do *E. grandis* induziu as raízes de *A. mangium* a crescerem próximo à árvore nas camadas onde a pressão competitiva era menor.

A estratificação de copas traz benefícios para povoamentos mistos se forem escolhidas espécies de diferentes comportamentos quanto às estratégias de captação de luz. Espécies capazes de captar luz abaixo de um dossel superior e desenvolverem sem ser suprimidas pela outra espécie é fundamental para o sucesso dos povoamentos mistos.

A nodulação foi sensível a competição com o *E. grandis*, aparentemente, devido à variação de umidade e temperatura sazonal.

REFERÊNCIAS

- AKINNIFESI, F.K.; KANG, B.T.; LADIPO, D.O. Structural root form and fine root distribution of some woody species evaluated for agroforestry systems. **Agroforestry Systems**, Dordrecht, v. 42, p. 121-138, 1999.
- ALMEIDA, N.O.; GARCIA, R.; NEVES, J.C.L.; COUTO, L. Crescimento inicial de eucaliptos em consórcio com leguminosas em região de Cerrado em Minas Gerais. In: CONGRESSO BRASILEIRO SOBRE SISTEMAS AGROFLORESTAIS, 1., 1994. Porto Velho. **Anais...** Colombo: EMBRAPA CNPF, (EMBRAPA. CNPF. Documentos, 27) v. 2.
- ALLEN, S.; JOSE, S.; NAIR, P. K. R.; BRECKE, B. J.; NKEDI-KIZZA, P. Safety net role of tree roots: experimental evidence from an alley cropping system. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 192, p. 395-407, 2004.
- ANDERSON, L.J.; COMAS, L.H.; LASKO, A.N.; EISSENSTAR, D.M. Multiple risk factors in root survivorship: a 4-year study in Concord grape. **New Phytologist**, London, v. 158, p. 489-501, 2003.
- ANDRADE, A.G.; COSTA, G.S.; FARIA, S.M. Deposição e decomposição da serapilheira em povoamentos de *Mimosa caesalpinifolia*, *Acacia mangium* e *Acacia holosericea* com quatro anos de idade em planossolo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, p. 777-785, 2000.
- BALIEIRO, F.C. **Biomassa acumulada e nutrientes na água da chuva em plantios puros e consorciados de *Acacia mangium* Willd., *Pseudosamanea guachapele* Dugrand e *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden.** 1999. 99 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1999.
- BALIEIRO, F.C.; FONTES, R.L.F.; DIAS, L.E.; FRANCO, A.A.; CAMPELLO, E.F.C.; FARIA, S.M. de. Accumulation and distribution of aboveground biomass and nutrients in pure and mixed stands of guachapele and eucalyptus. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 25, n. 12, p. 2639-2654, 2002.
- BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F.; NEVES, J.C.L. Fertilização e correção do solo para o plantio de eucalipto. In: BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F. (Ed.). **Relação solo eucalipto.** Viçosa: Ed. Viçosa, 1990. p. 127-186.
- BAUHUS, J.; KHANNA, P.K.; MENDEN, N. Aboveground and belowground interactions in mixed plantations of *Eucalyptus globulus* and *Acacia mearnsii*. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 30, n. 12, p. 1886-1894, 2000.
- BAUHUS, J.; VAN WINDEN, A.P.; NICOTRA, A.B. Above-ground interactions and productivity in mixed-species plantations of *Acacia mearnsii* and *Eucalyptus globulus*. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 34, p. 686-694, 2004.

BEGON M. Density and individual fitness: asymmetric competition. In: SHORROCKS, B. (Ed.). **Evolutionary ecology**. Oxford: Blackwell, 1984. p. 175-194.

BINKLEY, D. Bioassays of the influence of *Eucalyptus saligna* and *Albizia falcataria* on soil nutrient supply and limitation. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 91, n. 2/3, p. 229-234, 1997.

BINKLEY, D.; GIARDINA, C. Nitrogen fixation in tropical forest plantations. In: NAMBIA, S.; BROWN, A.(Ed.). **Management of soil, nutrients and water in tropical plantation forests**. Canberra: ACIAR; CSIRO; CIFOR, 1997. p. 571.

BINKLEY, D.; DUNKIN, K.A.; DEBELL, D.; RYAN, M.G. Production and nutrient cycling in mixed plantations of *Eucalyptus* and *Albizia* in Hawaii. **Forest Science**, Washington, DC, v. 38, n. 2, p. 393-408, 1992.

BINKLEY, D.; GIANDINA, C.; BASHKIN, M.A. Soil phosphorous pools and supply under the influence of *Eucalyptus saligna* and nitrogenfixing *Albizia facaltaria*. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.128, p. 241-247, 2000.

BINKLEY, D.; SENOCK, R.; CROMACK, K.J. Phosphorus limitation on nitrogen fixation by *Falcataria* seedlings. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 186, p. 171-176, 2003.

BODDEY, R.M.; PEOPLES, M.B.; PALMER, B.; DART, P.J. Use of the ¹⁵N natural abundance technique to quantify biological nitrogen fixation by woody perennials. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**; Wageningen, v. 57, p. 235-270, 2000.

BOUILLET, J.P.; LACLAU, J.P.; ARNAUD, M.; THONGO, A. Changes with age in the spatial distribution of roots of a *Eucalyptus* clone in the Congo. Impact on water and nutrient uptake ability. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 171, p. 43-57, 2002.

BOUILLET, J.P.; LACLAU, J.P.; GONÇALVES, J.L.M.; MOREIRA, M.Z.; TRIVELIN, P.C.O.; JOURDAN, C.; SILVA, E.V.; PICCOLO, M.C.; TSAI, SUI MUI; GALIANA, A. Mixed-species plantations of *Acacia mangium* and *Eucalyptus grandis* in Brazil. 2. Nitrogen accumulation in the stands and N₂ biological fixation. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, 2007. No prelo.

BOYDEN, S.; BINKLEY, D.; SENOCK, R. Competition and facilitation between *Eucalyptus* and nitrogen-fixing *Falcataria* in relation to soil fertility. **Ecology**, Washington, DC, v. 86, n. 4, p. 992-1001, 2005.

CALDWELL, M.M.; PEEK, M.S.; LEFFER, A.J.; IVANS, C.Y.; RYEL, R.J. Fire root distribution and persistence under field conditions of tree co-occurring. Great Basin species of different life form. **New Phytologist**, London, v. 165, p. 171-180, 2005.

CASPER, B. B.; JACKSON, R.B. Plant competition underground. **Annual Review of Ecological Systems**, Palo Alto, v. 28, p. 545-570, 1997.

COELHO, S.R. F.; GONÇALVES, J.L.M.; LACLAU, J.P.; MELLO, S.L.M.; MOREIRA, R.M.; SILVA, E.V. Crescimento, nutrição e fixação biológica de nitrogênio em plantios mistos de eucalipto e leguminosas arbóreas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.42, n.5, 2007. No prelo.

COLE, T.G.; YOST, R.S.; KABLAN, R.; OLSEN, T. Growth potential of twelve *Acacia* species on acid soils in Hawaii. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 80, p. 175-186, 1996.

CORBEELS, M.; MCMURTRIE, R.E.; PEPPER, D.A.; MENDHAM, D.S.; GROVET, T.S.; O'CONNELL, A.M. Long-term changes in productivity of eucalypt plantations under different harvestresidue and nitrogen management practices: a modelling analysis. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 217, p. 1-18, 2005.

CORTEZ, N.R.S. **Compartimentos e ciclos de nutrientes em plantações de *Eucalyptus globulus* Labill. Ssp. *Globulus* e *Pinus pinaster* Aiton.** 1996. 317 p. Tese (Ph. D.) - Instituto Superior de Agronomia, Lisboa, 1996.

DEBELL, D.S.; COLE, T.C.; WHITESELL, C.D. Growth, development, and yield of pure and mixed stands of *Eucalyptus* and *Albizia*. **Forest Science**, Washington, DC, v. 43, p. 286-298, 1997.

DYE, P.J. Climate, forest and streamflow relationships in South Africa afforested catchments. **Commonwealth Forest Review**, Oxford, v. 75, n. 1, p. 31-38, 1996.

EISSENSTAR, D.M.; WELLS, C.E.; YANAI, R.D.; WHITBECK, J.L. Building roots in a changing environment: implications for root longevity. **New Phytologist**, London, v.147, p. 33-42, 2000.

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

FAO. **Mixed and pure forest plantations in the tropics and subtropics.** Rome, 1992. 152 p. (FAO Forestry Paper, 103).

FAO. **Global forest resource assessment 2000.** Rome, 2001. 479 p. (FAO Forestry Paper, 140).

FITTER, A.H. Architecture and biomass allocation as components of the plastic response of root systems to soil heterogeneity. In: CALDWELL, M. M.; PEARCY, R. W. (Ed.). **Exploitation of environmental heterogeneity by plants ecophysiological processes above- and belowground.** San Diego: Academic Press, 1994. p. 305-323.

FRANCO, A.A.; FARIA, S.M. The contribution of N₂-fixing tree legumes to land reclamation and sustainability in the tropics. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 29, p. 897-903, 1997.

FRANCO, A.A.; DIAS, L.E.; FARIA, S.M.; CAMPELLO, E.F.C.; SILVA, E.M.R. Uso de leguminosas florestais noduladas e micorrizadas como agentes de recuperação e manutenção da vida do solo: um modelo tecnológico. In: ESTEVES, F. (Ed.). **Oecologia Brasiliensis: estrutura, funcionamento e manejo de ecossistemas**. Rio de Janeiro, 1995. p. 459-467.

FORRESTER, D.I.; BAUHUS, J.; COWIE, A.L. On the success and failure of mixed-species tree plantations: lessons learned from a model system of *Eucalyptus globulus* and *Acacia mearnsii*. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 209, p. 147-155, 2005.

FORRESTER, D.I.; BAUHUS, J.; KHANNA, P.K. Growth dynamics in a mixed-species plantation of *Eucalyptus globulus* and *Acacia mearnsii*. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 193, p. 81-85, 2004.

FORRESTER, D.I.; BAUHUS, J.; COWIE, A.L.; VANCLAY, J.K. Mixed-species plantations of *Eucalyptus* with nitrogen-fixing trees: a review. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, 2006. doi:10.1016/j.foreco.2006.05.012.

GALIANA, A.; BALLE, P.; KANGA, A.N.G.; DOMENACH, A.M. Nitrogen fixation estimated by the ¹⁵N natural abundance method in *Acacia mangium* Willd. inoculated with *Bradyrhizobium sp.* and grown in silvicultural conditions. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 34, n. 2, p. 251-262, 2002.

GARAY, I.; PELLENS, R.; KINDEL, A.; BARROS, E.; FRANCO, A. Evaluation of soil conditions in fast-growing plantations of *Eucalyptus grandis* and *Acacia mangium* in Brazil: A contribution to the study of sustainable land use. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 27, n.2, p. 177-187, 2004.

GONÇALVES, J.L.M ; BARROS, N.F. Improvement of site productivity for short-rotation plantations in Brazil. **Bosque**, Valdivia, v. 20, p. 89-106, 1999.

GONÇALVES, J. L.M.; MENDES, K.C.F.S.; SASAKI, C.M. Mineralização de nitrogênio em ecossistemas florestais naturais implantados do Estado de São Paulo. **Revista brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, p. 601-616, 2001.

GONÇALVES, J.L.M.; BARROS, N.F.; NAMBIAR, E.K.S.; NOVAIS, R.F. Soil and stand management for short-rotation plantations. In: NAMBIA, S.; BROWN, A.(Ed.). **Management of soil, nutrients and water in tropical plantation forests**. Canberra, ACIAR; CSIRO; CIFOR, 1997. p. 379-418.

- GONÇALVES, J. L.M.; STAPE, J.L.; LACLAU, J.P.; SMETHURST, P.; GAVA, J.L. Silvicultural effects on the productivity and wood quality of eucalypts plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 193, p. 45-61, 2004.
- HARA, T. Effects of density and extinction coefficient on size variability in plant populations. **Annals of Botany**, Oxford, v. 57, p. 885-892, 1986.
- HERBERT, M.A.; SCHÖNAU, A.P.G. Fertilising commercial forest species in Southern Africa: research progress and problems (part 2). **South African Forestry Journal**, Pretoria , v. 152, p. 34-42,1990.
- HOLMGREN, M.; SCHEFFER, M.; HUSTON, M.A. The interplay of facilitation and competition in plant communities. **Ecology**, Washington, DC, v. 78, n. 7, p. 1566-1975, 1997.
- HUNT, M.A.; UNWIN, G.L.; BEADLE, C.L. Effects of naturally regenerated *Acacia dealbata* on the productivity of a *Eucalyptus nitens* plantation in Tasmania, Australia. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam , v. 117, p. 75-85, 1999.
- HUNT, M.A.; BATTAGLIA, M.; DAVIDSON, N.J.; UNWIN, G.L. Competition between plantation *Eucalyptus nitens* and *Acacia dealbata* weeds in northeastern Tasmania. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 233, p. 260-274, 2006.
- JOHANSEN, D.A. **Plant micro-technique**. New York: McGraw-Hill Book, 1940. 523 p.
- KAYE, P.J.; RESH, S.C.; KAYE, M.W.; CHIMNER, R.A. Nutrient and carbon dynamics in a replacement series of Eucalyptus and Albizia trees. **Ecology**, Washington,DC, v. 81 n. 12, p. 3267-3273, 2000.
- KELTY, M.J. Comparative productivity of monocultures and mixed-species stands. In: KELTY, M.J.; LARSON, B.C.; OLIVER, C.D. (Ed.). **The ecology and silviculture of mixed-species forests**. Dordrecht: Kluwer Academic, 1992. p .125-141.
- KELTY, M.J.; CAMERON, I.R. Plot designs for the analysis of species interactions in mixed stands. **Commonwealth Forest Review**, Oxford, v. 74, p. 322-332, 1995.
- KHANNA, P.K. Comparison of growth and nutrition of young monocultures and mixed stand of *Eucalyptus globulus* and *Acacia mearnsii*. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 94, n. 1/3, p. 105-113, 1997.
- KOCH, A.S.; MATZNER, E. Heterogeneity of soil and soil solution chemistry under Norway spruce (*Picea abies* Karst.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.) as influenced by distance from the stem basis. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 151, p. 227-237, 1993.

- LACLAU, J.P. **Dynamique du fonctionnement mineral d'une plantation d'eucalyptus. Effets du reboisement sur un sol de savane du littoral congolais; conséquences pour la gestion des plantations industrielles.** 2001. 148 p. Thesis (PhD in Forest Resources) - Institut National Agronomique Paris-Grignon, Paris, 2001.
- LACLAU, J.P.; RANGER, J.; NZILA, J.D.; BOUILLET, J.P.; DELEPORTE, P. Nutrient cycling in a clonal stand of *Eucalyptus* and an adjacent savanna ecosystem in Congo. 2. Chemical composition of soil solutions. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 180, p. 527-544., 2003.
- LACLAU, J.P.; TOUSTAIN, F.; M'BOV, A.T.; ARNAUD, M.; JOFFRE, R.; RANGER, J. The function of the superficial root mat in the biogeochemical cycles of nutrients in congolenses eucalyptus plantations. **Annals of Botany**, Oxford, v. 53, p. 249-261, 2004.
- LACLAU, J.P.; RANGER, J.; DELEPORTE, P.; NOUVELLON, Y.; SAINT-ANDRÉ, L.; MARLET, S.; BOUILLET, J.P. Nutrient cycling in a clonal stand of eucalyptus and an adjacent savanna ecosystem in Congo. 3. Input – output budgets and consequences for the sustainability of the plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 210, p. 375-391, 2005.
- LACLAU, J.P.; BOUILLET, J.P.; GONÇALVES, J.L.M.; SILVA, E.V.; JOURDAN, C.; CUNHA, M.C.S.; MOREIRA, M.R.; SAINT-ANDRÉ, L.; MAQUÈRE, V.; NOUVELLON, Y.; RANGER J. Mixed-species plantations of *Acacia mangium* and *Eucalyptus grandis* in Brazil. 1. Growth dynamics and net primary production. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, 2007. No prelo
- LELES, P.S.; DOS, S. **Crescimento, alocação de biomassa e distribuição de nutrientes e uso de água em *E. camaldulensis* e *E. Pellita* sob diferentes espaçamentos.** 1995. 133 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1995.
- MARTIN, K.J.; POSAVATZ, N.J.; MYROLD, D.D. Nodulation potential of soils from red alder stands covering a wide age range. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 254, p. 187-192, 2003.
- MEDHURST, J.L.; PINKARD, E.A.; BEADLE, C.L.; WORLEDGE, D. Growth and stem form responses of plantation-grown *Acacia melanoxylon* (R. Br.) to form pruning and nurse-crop thinning. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 179, p. 183-193, 2003.
- MELLO, S.L.M. **Características do sistema radicular de povoamentos de eucaliptos propagados por sementes e estacas.** 1997. 91 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais).- Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1997.

MELLO, S.L.M. **Dinâmica de raízes finas e aporte de carbono no solo sob povoamentos de *Eucalyptus grandis* no Estado de São Paulo**. 2004. 84 p. Tese (Doutorado em Energia Nuclear na Agricultura) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

MONTAGNINI, F. Accumulation in above-ground biomass and soil storage of mineral in pure and mixed plantations in a humid tropical lowland. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 134, p. 257-270, 2000.

MONTAGNINI, F.; GONZALES, E.; PORRAS, C. Mixed and pure forest plantations in the humid neotropics: a comparison of early growth, pest damage and establishment costs. **Commonwealth Forest Review**, Oxford, v. 74, p. 306-314, 1995.

MOREIRA, F.M.S. **Microbiologia e bioquímica do solo**. Lavras: Editora. UFLA, 2002. 626 p.

NEAVE, I.A.; FLORENCE, R.G. The effect of root configuration on the relative competitive ability of *Eucalyptus maculata* Hook. regrowth following clearfelling. **Australian Forestry**, Yarralumla, v. 57, p. 49–58, 1994.

NEPSTAD, D.C.; CARVALHO, C.R.; DAVIDSON, E.A.; JIPP, P.H.; LEFEBVRE, P.A.; NEGREIROS, G.H.; SILVA, E.D.; STONE, T.; TRUMBORE, S.E.; VIEIRA, S. The role of deep roots in hydrological and carbon cycles of Amazonian forests and pastures. **Nature**, London, v. 372, p. 666-669, 1994.

O' CONNELL, A.M; GROVE, T.S; NAMBIAR, E.K.S; COSSALTER, C.; TIARKS, A. Eucalypt plantations in south-western Australia. Site management and productivity in tropical plantation forests. **Workshop Proceedings**, Pietermaritzburg, 1999. p. 53-59.

PARROTA, J.A. Productivity, nutrient cycling, and succession in single and mixed-species plantations of *Casuarina equisetifolia*, *Eucalyptus robusta* and *Leucena leucocephala* in Puerto Rico. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 124, p. 45-77, 1999.

PASSOS, C.A.M. **Comportamento inicial do eucalipto (*Eucalyptus grandis* W. HILL ex Maiden) em plantio consorciada com feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) no vale do Rio Doce, Minas Gerais**. 1990. 64 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1990.

PREGITZER, K.S.; HENDRICK, P.L.; FOGEL, R. The demography of fine roots in respos to patches of water and nitrogen. **New Phytologist**, London, v. 125, p. 575-580, 1993.

RADERSMA, S.; LUSIANA, B.; VAN NOORDWIJK, M. Simulation of soil drying induced phosphorus deficiency and phosphorus mobilization as determinants of maize growth near tree lines on a Ferralsol. **Field Crops Research**, St. Paul, v. 91, p. 171-184, 2005.

- RAIJ, B. van; ANDRADE, H.; CANTARELLA, H.; QUGGIO, J.A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001. 285 p.
- REIS, M.G.; BARROS, N.F.; KIMMINS, J.P. Acúmulo de nutrientes em uma seqüência de idade de *Eucalyptus grandis* W. Hill (ex – Maiden) plantado no cerrado em duas áreas com diferentes produtividades, em Minas Gerais. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 11, n. 1, p. 1-15, 1987.
- RESH, S. C; BINKLEY, D; PARROTA, J. A. Greater Soil Carbon Sequestration under nitrogen-fixing trees compared with *Eucalyptus* species. **Ecosystems**, New York, v. 5 p. 217-231, 2002.
- SAS INSTITUTE. **SAS/STAT software and enhancement, release 6.11 edition**. Cary, 1998.
- SCHULZE, E.D.; CHAPIN, I.F.S.; GEBAUER, G. Nitrogen nutrition and isotope differences among life forms at the northern treeline of Alaska. **Oecologia**, New York, v. 100, p. 406- 412, 1994.
- SERRANO, M.I.P. **Mineralização, absorção e lixiviação de nitrogênio em povoamentos de *Eucalyptus grandis* sob cultivo mínimo e intensivo do solo**. 1997. 81 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1997.
- SHIBU, J.; WILLIAMS, R.; ZAMORA, D. Belowground ecological interactions in mixed-species forest plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, 2006. doi: 10.1016/j.foreco.2006.05.014.
- SILVEIRA, R.L.V.A.; HIGASHI, E.N.; GONÇALVES, A .N.; MOREIRA, A. Avaliação do estado nutricional do *Eucalyptus*: diagnose visual, foliar e suas interpretações. In: GONÇALVES, J.L.M.; BENEDETTI, V. (Ed.). **Nutrição e fertilidade florestal**. Piracicaba: IPEF, 2000. p. 79 -104.
- SOARES, J.V.; ALMEIDA, A.C. Modeling the water balance and soil water fluxes in a fast growing *Eucalyptus* plantation in Brazil. **Journal of Hydrology**, Chichester, v. 253, p. 130-147, 2001.
- SPSS. **SIGMAPLOT software**: version 8th ed. Chicago, 2002.
- VANDERMEER, J. **The ecology of intercropping**. New York: Cambridge University Press, 1989. 249 p.
- VANDERMEER, J. The ecological basis of alternative agriculture. **Annual Review of Ecological Systems**, Palo Alto, v. 26, p. 201-224, 1995.

VEZZANI, F.M.; TEDESCO, M.J.; BARROS, N.F. Alterações dos nutrientes no solo e nas plantas em consórcio de *eucalipto* e *Acácia negra*. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, p. 225-231, 2001.

WEINER, J. How competition for light and nutrients affects size variability in *Ipomea tricolor* populations. **Ecology**, Washington, DC, v. 67, p. 1425-1427, 1986.

WONG, S.C.; DUNIN, F.X. Photosynthesis and transpiration of trees in a eucalypt forest stand: CO₂, light and humidity responses. **Australian Journal of Plant Physiology**, Melbourne, v. 14, p. 619-632, 1987.