

**Anais da 46<sup>a</sup> Reunião Técnico-Científica do  
Programa Temático de Silvicultura e Manejo  
“Nutrição e Fertilização Florestal”**

**Dias 10 e 11 de outubro de 2012  
Porto Seguro, Bahia, Brasil**

**José Henrique Bazani, ESALQ/USP  
Rodrigo Eiji Hakamada, International Paper  
José Carlos Arthur Junior, IPEF  
José Leonardo de Moraes Gonçalves, ESALQ/USP**



**Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais**

## Efeito da associação de leguminosas no ciclo de nitrogênio nas plantações de eucaliptos

**Jean-Pierre Daniel Bouillet**

Pesquisador do CIRAD, UMR Eco&Sols, [jean-pierre.bouillet@cirad.fr](mailto:jean-pierre.bouillet@cirad.fr)

**Maureen Voigtlaender**

Consultora, [mvoigtlaender@gmail.com](mailto:mvoigtlaender@gmail.com)

**Jean-Paul Laclau**

Pesquisador do CIRAD, UMR Eco&Sols, [jean-paul.laclau@cirad.fr](mailto:jean-paul.laclau@cirad.fr)

**José Leonardo de Moraes Gonçalves**

Professor Titular do Departamento de Ciências Florestais da ESALQ/USP, [jlmgonca@usp.br](mailto:jlmgonca@usp.br)

**José Luiz Gava**

Divisão de Tecnologia Florestal da Suzano Papel e Celulose, [jgava@suzano.com.br](mailto:jgava@suzano.com.br)

**Fernando Palha Leite**

Coordenador Pesquisa da CENIBRA, [fernando.leite@cenibra.com.br](mailto:fernando.leite@cenibra.com.br)

**Rodrigo Eiji Hakamada**

Pesquisador da International Paper, [rodrigo.hakamada@ipaper.com](mailto:rodrigo.hakamada@ipaper.com)

**Louis Mareschal**

Pesquisador do CIRAD, UMR Eco&Sols, [louis.mareschal@cirad.fr](mailto:louis.mareschal@cirad.fr)

**André Mabiala**

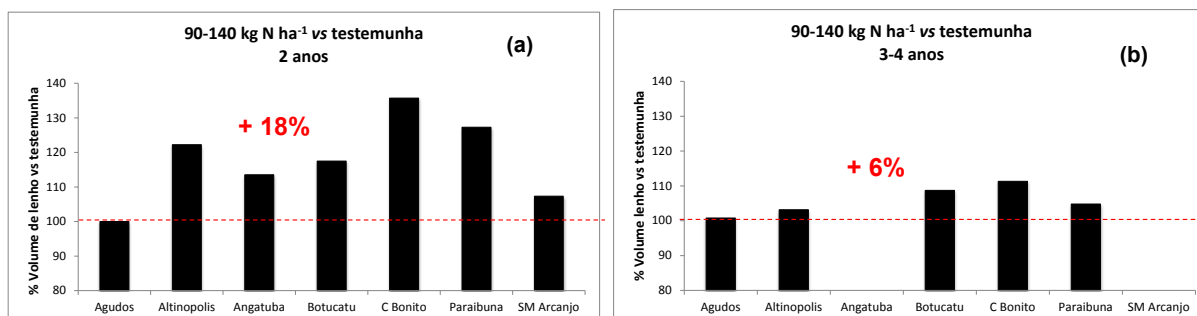
Pesquisador do CRDPI, [andre.mabiala@cirad.fr](mailto:andre.mabiala@cirad.fr)

**Yann Nouvellon**

Pesquisador do CIRAD, UMR Eco&Sols, [yann.nouvellon@cirad.fr](mailto:yann.nouvellon@cirad.fr)

## INTRODUÇÃO

O nitrogênio (N) é um componente de todas as células vivas, proteínas e enzimas e está envolvido nos processos metabólicos, de transferência de energia e da fotossíntese (a RuBisCO e a clorofila contêm N). Este nutriente é considerado como um dos principais fatores limitantes do crescimento das árvores em florestas tropicais e a aplicação adicional de N é obrigatório para uma produção sustentável de muitos ecossistemas florestais (FISHER; BINKLEY, 2000). Esta fertilização é aplicada nas plantações de eucaliptos no mundo inteiro, como na Argentina (GRACIANO et al., 2008), no Congo (LACLAU et al., 2010), na África do Sul (DU TOIT; SCHOLLES, 2002), na Austrália (COORBEELS et al., 2005) ou na Indonésia (MACKENSEN; FÖLSTER, 2000). No Brasil, 20-200 kg ha<sup>-1</sup> de N são aplicados a cada rotação, mas com uma resposta forte apenas o início da rotação (PULITO, 2009) (Figura 1). A causa é que a água torna-se um fator mais limitante que N após os primeiros anos (BOUILLET et al., 2013).



**Figura 1** - Resposta dos eucaliptos a adubação N no plantio, com média de +18% a 2 anos (a) e +6% a 3-4 anos (b) (fonte: Pulito, 2009). A linha tracejada representa a produção sem adubação N.

Mesmo no caso de uma pequena resposta à fertilização nitrogenada, a entrada de N no ecossistema parece muito importante para a sustentabilidade das plantações de eucaliptos. Por exemplo, na estação experimental da USP-ESALQ em Itatinga/SP (23°02' S e 48°38' W), a fertilização de 120 kg ha<sup>-1</sup> de N (com 33 e 100 kg ha<sup>-1</sup> de P, K, respectivamente e 2 toneladas ha<sup>-1</sup> de calcário dolomítico) conduziu a um balanço de N negativo, mesmo quando somente houve exportação do tronco sem casca dos talhões (Tabela 1). Sem adubação N, o balanço de N apresentou-se negativo (- 100 a - 250 kg N ha<sup>-1</sup>) para todos os tratamentos.

**Tabela 1** - Balanço de N pela rotação de eucaliptos em Itatinga (SP) (fonte: Silva et al., 2013, alterada)

Balanço pela rotação	N (kg ha <sup>-1</sup> )
Tronco sem casca	- 50
Tronco com casca	- 85
Tronco + galhos grossos	- 95
Árvore inteira	- 200

Desta forma, a adição de N faz-se necessária para assegurar a produção sustentável das plantações de eucaliptos. No entanto, os fertilizantes a base N são dispendiosos (□ 400-500 US\$ tonelada<sup>-1</sup> FOB de uréia em 2012) (FERTILIZERWORKS, 2014) com uma tendência ao aumento em médio/longo prazo: o preço da uréia foi multiplicado por 4 entre 2000 e 2010 e dobrou entre 2009 e 2012 (FERTILIZERWORKS, 2014). Uma solução alternativa pode ser a associação de espécies leguminosas com eucaliptos.

### Rede de plantações consorciadas de *E. grandis* / *E. urophylla*\**grandis* e *Acacia mangium* no Brasil e no Congo

Uma rede de experimentos sobre plantios mistos foi instalada no Brasil e no Congo em 2004 e 2005. O objetivo era quantificar o funcionamento hídrico, carbono e mineral das plantações consorciadas de *Eucalyptus* com *Acacia mangium* em condições ecológicas contrastantes: Estação Experimental da USP-ESALQ (Itatinga - SP), empresa Suzano (Bofete - SP), empresa International Paper (Luiz Antonio - SP), empresa Cenibra (Santana de Paraiso - MG) e CRDPI (Pointe-Noire - Congo). Os tratamentos testados foram:

**1)** 100A: *A. mangium*; **2)** 100E: *Eucalyptus* com fertilização igual à de referência (sem N); **3)** 100E+N: *Eucalyptus* com adubação igual à de referência (com N, similar as doses nas empresas da região) ; **4)** 25A:100E: 100%E + 25 % *A. mangium* ; **5)** 50A:100E: 100%E + 50% *A. mangium* ; **6)** 100A:100E: 100%E + 100% *A. mangium* ; **7)** 50A:50E: 50% *Eucalyptus* + 50% *A. mangium*

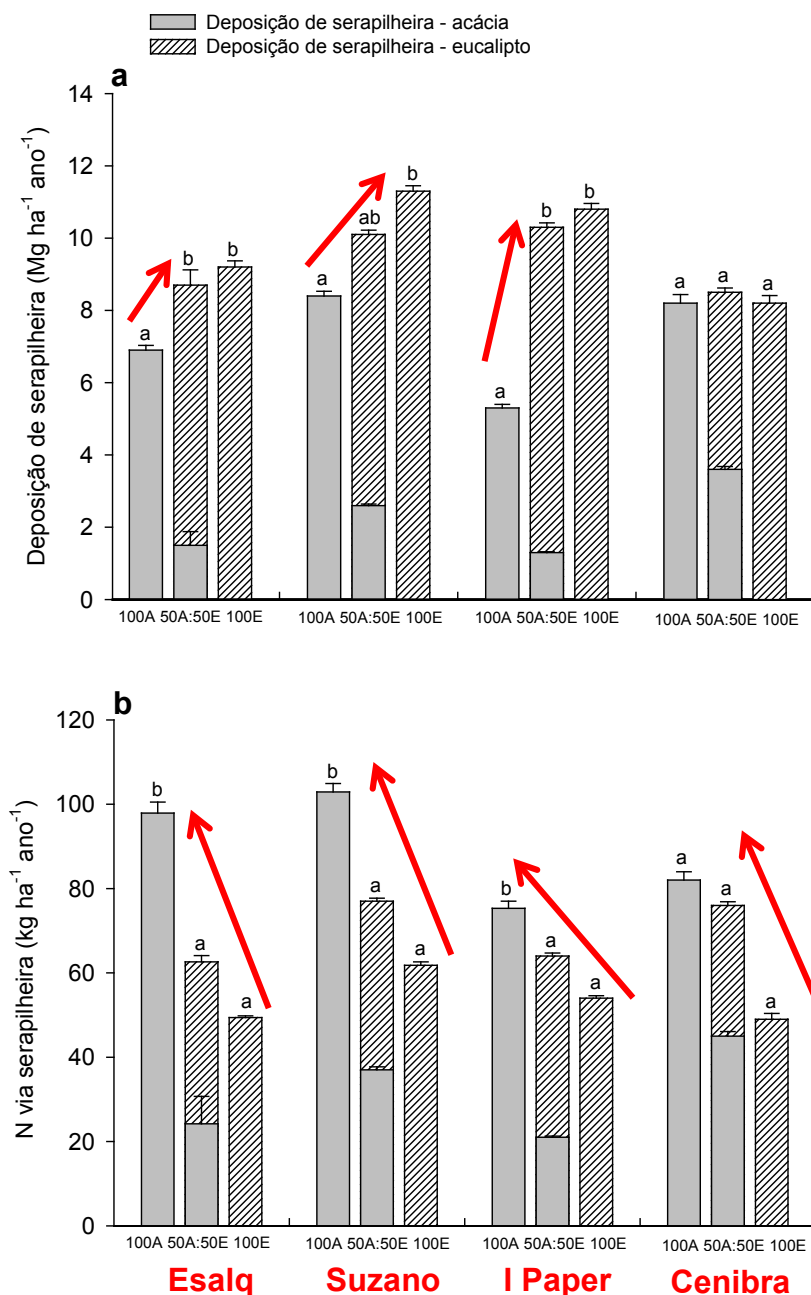
### Produção dos povoamentos

Os tratamentos aditivos (nA:100E) apresentaram uma produção maior (+5% a +40%) no início da rotação em Itatinga, Cenibra e no Congo por causa de complementaridade entre as espécies com maior área foliar total e maior captação da luz (le Maire et al., 2013). Mas as plantações consorciadas não foram mais produtivas aos 6 anos no Brasil (BOUILLET et al., 2013). O maior uso da água no início ocasionou uma forte concorrência intra- e inter-específica para este recurso no fim da rotação e a perda da produção adicional dos primeiros anos. Ao contrário, uma produção maior (+20% a +35%) foi observada no Congo nos plantios mistos (BOUILLET et al., 2013). Nesta área uma parte significativa da chuva é perdida por lixivação profunda nas monoculturas de eucaliptos (LACLAU et al., 2010). Desta forma, observou-se complementaridade entre as espécies na rotação inteira resultando em uma melhor captação dos recursos (luz e água) e uma maior produção dos povoamentos. Além disso, os eucaliptos puderam aproveitar da facilitação por fixação de N<sub>2</sub> pela *A. mangium* e transferência de N (cf infra).

## Ciclo de nitrogênio no Brasil

### Deposição da serapilheira no fim da rotação

A matéria seca de serapilheira depositada em 100E foi maior que em 50A:50E e em 100A, exceto na Cenibra. Mas a entrada de N, via deposição foi 1,7 vez, maior em 100A (75 a 103 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>) do que em 100E (49 a 62 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>) (Figura 2). Em 50A:50E, as quantidades de N na serapilheira foram intermediárias, variando entre 63 e 77 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> (VOIGTLAENDER, 2012).



**Figura 2** - Deposição anual de serapilheira (a) e deposição anual de N (b) entre 4 e 6 anos depois do plantio, em 100A, 50A:50E e 100E na ESALQ-Itatinga, na Suzano-Bofete, na International Paper-Luiz Antônio e na Cenibra-Santana do Paraíso. O erro-padrão entre os blocos é indicado, para cada tratamento, nas barras verticais ( $n = 3$ ). Letras diferentes indicam diferença significativa entre os tratamentos na mesma área ( $P < 0,05$ ) (fonte : Voigtlaender, 2012)

### Estoques de C e N (exemplo de Itatinga)

Ao fim do cultivo, os estoques do C total no solo em Itatinga, incluindo a serapilheira acumulada e o solo da camada 0-15 cm, não apresentaram diferenças entre os tratamentos. As diferenças foram observadas na camada Oi (material não-fragmentado) (Tabela 2), com um estoque menor de C em 100A do que em 100E. Ao contrário, os maiores estoques do N total observaram-se em 100A

(Tabela 2). Consistente com a deposição de serapilheira verificaram-se diferenças nos estoques da serapilheira entre os tratamentos, sendo maior em 100A. A quantidade de N estocada na serapilheira acumulada foi 40% maior em 100A do que em 100E. Na camada de 0-15 cm do solo, não se verificou diferença nos estoques de C e de N entre os tratamentos.

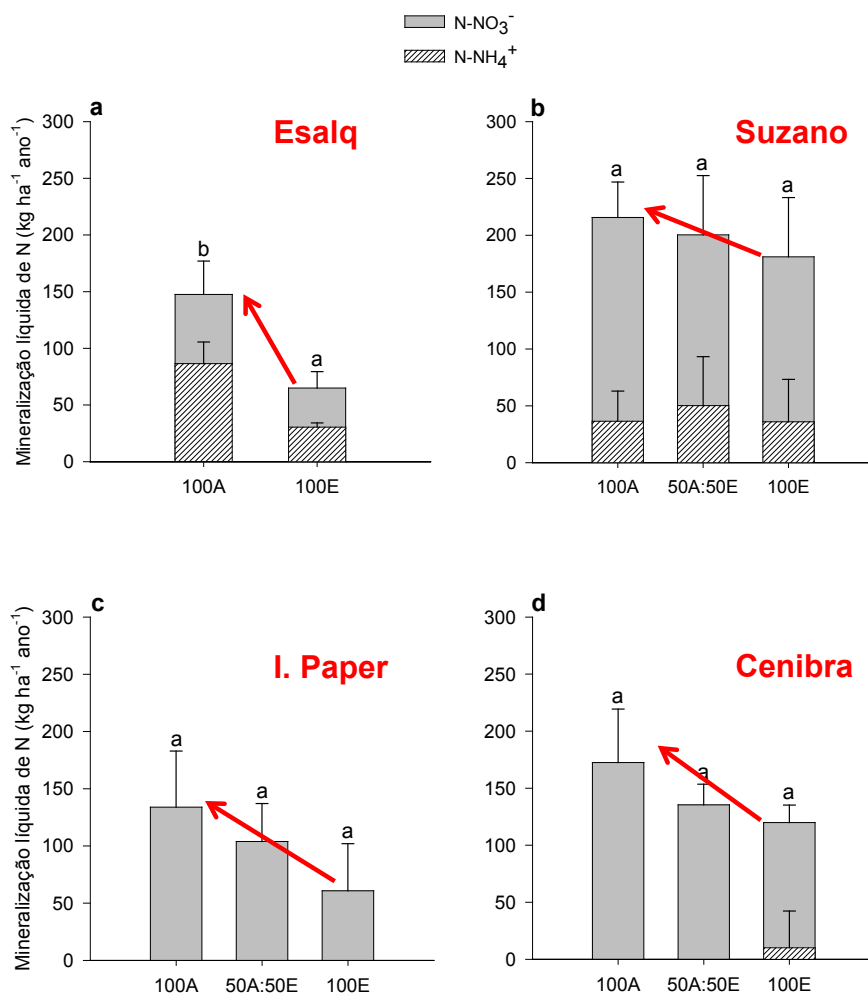
**Tabela 2** - Estoques de C e de N na serapilheira acumulada e na superfície do solo em 100A, 50A:50E e 100E em Itatinga (SP), ao final da rotação de cultivo (fonte : Voigtlaender, 2012)

Estoques	100A:0E	50A:50E	0A:100E
<b>C (kg ha<sup>-1</sup>)</b>			
Oi	445 a	3065 b	4376 c
Oe	3412 a	3762 a	3334 a
Oa	1269 a	974 a	1419 a
0-5 cm	8700 a	8750 a	10040 a
5-15 cm	12570 a	14090 a	11820 a
Serapilheira	5126 a	7712 b	9129 c
0-15 cm	21270 a	22840 a	21870 a
TOTAL	26396 a	30541 a	30989 a
<b>N (kg ha<sup>-1</sup>)</b>			
Oi	12 a	18 a	21 a
Oe	125 b	71 a	45 a
Oa	55 b	28 a	38 ab
0-5 cm	450 a	450 a	480 a
5-15 cm	770 a	800 a	670 a
Serapilheira	192 b	118 a	104 a
0-15 cm	1220 a	1250 a	1150 a
TOTAL	1412 a	1368 a	1254 a

Oi - material não-fragmentado ; Oe - material grosseiros ; Oa - material fino fragmentado

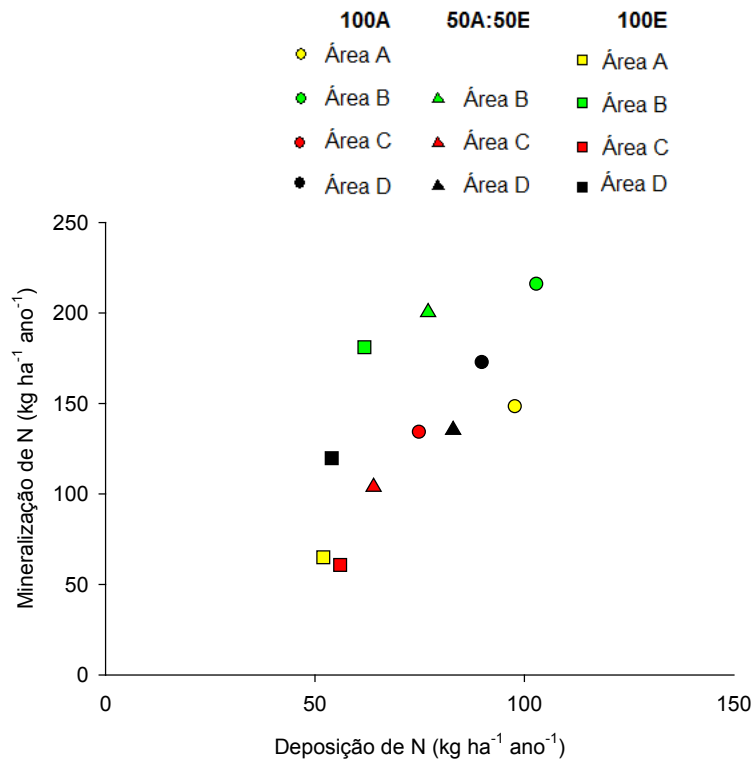
### Mineralização do N do solo

No fim da rotação observaram-se maiores taxas de mineralização no 100A (140-215 kg N ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>) que no 100E (60-180 kg N ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>), com diferenças significativas em Itatinga. Os valores no 50A:50E foram intermediárias. A nitrificação líquida correspondeu em média a 80% do total da mineralização líquida de N em todos os tratamentos. Na área de Luiz Antônio (Figura 3c) e na de Santana do Paraíso (Figura 3d), a amonificação líquida foi negativa, em média 7 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, indicando imobilização do NH<sub>4</sub><sup>+</sup> no solo.



**Figura 3** - Mineralização de N, no final da rotação de cultivo, em 100A e 100E nas áreas a) Esalq-Itatinga, b) Bofete-Suzano, c) Luiz Antônio-International Paper, d) Santana do Paraíso-Cenibra. O erro-padrão entre os blocos foi indicado, para cada tratamento nas barras verticais com (n = 4). Letras diferentes indicam diferença significativa entre os tratamentos na mesma área (P < 0,05) (fonte : Voigtlaender, 2012)

A mineralização de N aumentou com a deposição de N para as Acácias puras e no 50A:50E. Ao contrario, não se encontrou relação entre esses dois fluxos de N na monocultura de eucaliptos (Figura 4).



**Figura 4** - Mudança da mineralização de N com a deposição de N em 100A, 50A:50E e 100E nas quatro áreas experimentais (fonte: Voigtlaender, 2012)

### Fixação de N<sub>2</sub> e balanço de N no solo

A fixação de N<sub>2</sub> foi determinada pelo método de adição (Forrester et al., 2007), por meio da equação (1):

$$F_N = N_{total\ 1} - N_{total\ 2} \quad (1)$$

Onde:  $F_N$ : fixação de N<sub>2</sub>;  $N_{total\ 1}$ : soma de N na biomassa total, na serapilheira acumulada e na camada [0-15 cm] do solo em 100A ou 50A:50E;  $N_{total\ 2}$ : soma de N na biomassa total, na serapilheira acumulada e na camada [0-15 cm] do solo em 100E.

O balanço simplificado do nitrogênio no solo, foi calculado por meio da equação (2). Os demais fluxos de entrada e saída de N do ecossistema foram considerados iguais em todos os tratamentos, assumindo sem perdas de N por lixiviação profunda (Laclau et al., 2010) :

$$X = (F_N - a) - (0 - b) \quad (2)$$

Onde: X: incremento de N no solo em relação ao 100E;  $F_N$ : fixação de N<sub>2</sub>; a: exportação de N por meio da biomassa de lenho em 100A ou 50A:50E; b: exportação de N por meio da biomassa de lenho em 100E.

A fixação de N<sub>2</sub> na rotação variou entre 300 e 720 kg N ha<sup>-1</sup> rotação<sup>-1</sup> e 190 e 280 kg N ha<sup>-1</sup> rotação<sup>-1</sup> no 100A e 50A:50E, respectivamente (Tabela 3). O incremento de N no 50A:50E em relação a monocultura variou entre 190 e 290 kg N ha<sup>-1</sup> após uma rotação, o que são quantidades semelhantes ou maiores a adubação aplicada nas empresas.

**Tabela 3** - Balanço de nitrogênio no solo após uma rotação de cultivo de acácia, na plantação homogênea e consorciada, após sucessivas plantações de eucalipto (fonte : Voigtlaender, 2012, alterada)

Balanço de Nitrogênio	ESALQ			Suzano		
	100A	50A:50E	100E	100A	50A:50E	100E
	Kg ha <sup>-1</sup>					
Fixação de N <sub>2</sub>	453	233	0	304	229	0
Exportação de N biomassa de lenho	198	147	201	160	168	169
Incremento de N em relação 100E	456	287	0	313	230	0
	International Paper			Cenibra		
Fixação de N <sub>2</sub>	243	160	0	845	334	0
Exportação de N biomassa de lenho	135	162	191	288	215	159
Incremento de N em relação 100E	299	189	0	716	278	0

#### Ciclo de nitrogênio no Congo

As condições mais favoráveis para o crescimento de *A. mangium* (alta temperatura e umidade do ar) e a baixa disponibilidade de N no solo (Laclau et al., 2010) levou a uma fixação de N<sub>2</sub> atingindo, 210 kg N ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> no 100A e 140 kg N ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> no 50A:100E nos 3 primeiros anos após o plantio (Tabela 4).

**Tabela 4** - Percentagem do N da *A. mangium* derivado da fixação atmosférica (Ndfa%) e quantidade de N fixado a 34 meses no Congo (fonte: Bouillet et al., 2010)

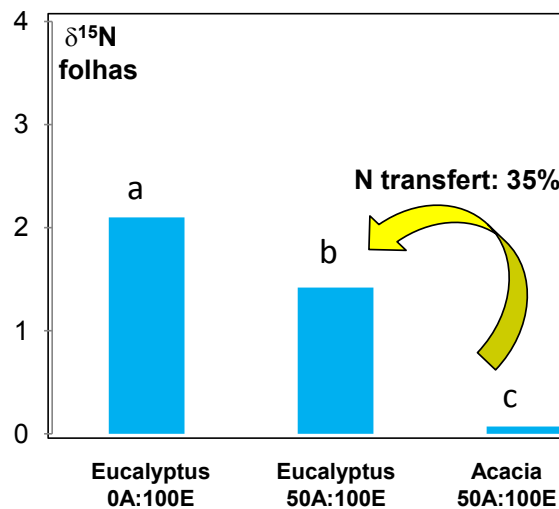
	100A	50A:100E
Ndfa% na biomassa em pé	84%	100%
Ndfa% depois do plantio	65%	90%
Total N na biomassa derivado da fixação biológica (kg N ha <sup>-1</sup> )	397	218
Total N derivado da fixação biológica depois do plantio (kg N ha <sup>-1</sup> )	592	341

Também se observou no mesmo período (do plantio até a idade de 34 meses) uma transferência de 35% do N das acácias para os eucaliptos no Congo (Figura 5). Esta transferência foi estimada por meio da equação (3) :

$$Tr = (\delta^{15}NEuc_{100E} - \delta^{15}NEuc_{50A:100E}) / (\delta^{15}NEuc_{100E} - \delta^{15}Nac_{50A:100E}) \quad (3)$$

Onde: Tr : transferência do N da *Acacia* para *Eucalyptus*;  $\delta^{15}NEuc_{100E}$  : abundância isotópica relativa natural de *Eucalyptus* no tratamento 100E;  $\delta^{15}NEuc_{50A:100E}$  : abundância isotópica relativa natural do *Eucalyptus* no tratamento 50A:100E;  $\delta^{15}Nac_{50A:100E}$  : abundância isotópica relativa natural de *Acacia* no tratamento 50A:100E





**Figura 5** - Estimativa da transferência de N, nos 34 primeiros meses depois do plantio, de *A. mangium* para *E. urophylla*\**grandis* no Congo no tratamento 50A:100E

## CONSIDERAÇÕES FINAIS: PLANTIOS MISTOS DE *EUCALYPTUS* E ESPÉCIE FIXADORA DE NITROGÊNIO (EFN): ONDE E POR QUÊ?

### Nas áreas ótimas para a produção das monoculturas de eucaliptos

A associação de uma leguminosa como *A. mangium* nos plantios de eucaliptos aumenta a intensidade do ciclo de N, mesmo quando a limitação hídrica não permite uma produção maior dos povoamentos ao final da rotação. Nestas regiões (SP, MG, BA), a introdução de *A. mangium* como sub-bosque permitiria reduzir ou mesmo suprimir a fertilização nitrogenada. A associação de leguminosas poderia aumentar também a disponibilidade do P mineral para acidificação da rizosfera e a do P orgânico pela produção de fosfatases (dados não mostrados).

A área foliar maior nos plantios mistos conduzindo ao fechamento mais rápido da copa e o desenvolvimento menor das ervas daninhas poderia reduzir significativamente a aplicação de herbicidas nas plantações. Outra opção, nesta parte do Brasil poderia ser uma rotação com plantação homogênea com espécie arbórea fixadora de N (EFN) após várias rotações com plantios de eucaliptos, para ajudar a manter a fertilidade de N do solo, com um manejo compatível com as práticas adotadas pelas empresas florestais.

Além das outras vantagens potenciais, como a diversificação dos produtos (carvão), em particular para os pequenos produtores, as plantações consorciadas poderiam reduzir a ocorrência dos problemas fitopatológicos. Desta forma, um experimento foi instalado em maio de 2013 na estação experimental de Itatinga para testar o efeito de *A. mangium* no desenvolvimento da ferrugem para os eucaliptos.

### Nas regiões marginais para monoculturas de eucaliptos

Uma parte importante de futura expansão das plantações de eucaliptos no Brasil (previsão > 10 milhões ha em 2020, ABRAF, 2011) deveria acontecer em regiões marginais para monoculturas (por causa da forte umidade e/ou nebulosidade, das altas temperaturas...). Os resultados obtidos no Congo mostraram a potencialidade de maior produção (+20-30%) nas plantações consorciadas que nas monoculturas de eucaliptos.

A associação de uma EFN também poderia ser decisiva para a sustentabilidade destas plantações, estabelecidas em uma parte importante em pastagens degradadas com deficiências fortes de N nos solos e grandes riscos de perdas de nutrientes pela drenagem profunda. Para tanto, a atual rede de experimentos para plantios mistos de eucaliptos com *A. mangium* será expandida ao Norte do Brasil

(PA, AMA, TO), no âmbito do projeto temático « Intensificação ecológica ». Os objetivos serão validar os resultados do Congo em um clima similar, monitorar a ciclo de N e definir melhor uma silvicultura específica para as plantações consorciadas (densidades, arranjo das espécies, desramas).

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem pelo suporte do projeto temático FAPESP (2010/16623-9), o projeto "Intens&Fix" (ANR-2010-STRA-004-03), Suzano, Cenibra e International Paper.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAF - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário estatístico da ABRAF 2011 ano base 2010**. Brasília: ABRAF, 2011. 130 p.

BOUILLET J.-P.; LACLAU J.-P.; GONÇALVES J. L. M.; VOIGTLAENDER M.; GAVA J.L.; LEITE F.P.; HAKAMADA R.; MARESCHAL L.; MABIALA A.; TARDY E.; LEVILLAIN J.; DELEPORTE P.; EPRON D.; NOUVELLON Y. Eucalyptus and Acacia tree growth and stand production over a full rotation in single- and mixed-species plantations across 5 sites in Brazil and Congo. **Forest Ecology and Management**, v. 301, p. 89 -101, 2013.

CORBEEL, S. 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 harvest residue and nitrogen management practices: A modelling analysis. **Forest Ecology and Management**, v. 217, n. 1, p. 1 - 18, 2005.

DU TOIT, B.; SCHOLE, M.C. Nutritional sustainability of Eucalyptus plantations: A case study at Karkloof, South Africa. **Southern African Forestry Journal**, v. 195 , p. 63-72, 2002.

FERTILIZEWORKS. Disponível em: < <http://fertilizerworks.com/> >. Acesso em: 01 mar. 2014.

FISHER, R. F.; BINKLEY, D. **Ecology and management of forest soils**. New York : John Wiley & Sons Inc., 2000. 489 p.

GRACIANO, C.; GOYA, J. F.; ARTURI, M.; PÉREZ, C.; FRANGI, J. L. Fertilization in a fourth rotation eucalyptus grandis plantation with minimal management. **Journal of Sustainable Forestry**, v. 26, p. 155-169, 2008.

LACLAU J. P.; RANGER J.; GONÇALVES, J. L. M.; MAQUÈRE, V.; KRUSCHE, A. V.; THONGO, M'BOU A.; NOUVELLON, Y.; SAINT-ANDRÉ, L.; BOUILLET, J. P.; PICCOLO, M. C.; DELEPORTE, P. Biogeochemical cycles of nutrients in tropical Eucalyptus plantations. Main features shown by intensive monitoring in Congo and Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 259, p. 1771-1785, 2010.

MACKENSEN, J.; FÖLSTER, H. Cost-analysis for a sustainable nutrient management of fast growing-tree plantations in East-Kalimantan, Indonesia. **Forest Ecology and Management**, v. 131, p. 239-253, 2000.

PULITO A. P. **Resposta a fertilização nitrogenada e estoques de nitrogênio biodisponível em solos usados para plantações de Eucalyptus**. 2009. 59 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

VOIGTLAENDER, M. **Produção de biomassa aérea e ciclagem de nitrogênio em consórcio de genótipos de Eucalyptus com Acacia mangium**. 2012. 86 p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.