

11

Eucalipto: desafios para a pesquisa em nutrição, na ótica da sustentabilidade florestal

Márcia Toffani Simão Soares

Shizuo Maeda

Marcos Silveira Wrege

Monica Moreno Gabira

Antônio Francisco Jurado Bellote

Guilherme de Castro Andrade

Luís Claudio Maranhão Froufe

Fabiano de Carvalho Balieiro

Guilherme Montandon Chaer

Felipe Martini dos Santos

Introdução

O Brasil está entre os principais produtores de celulose, papel e painéis de madeira no mundo, com uma área de 7,84 milhões de hectares de reflorestamento, sendo que o setor brasileiro de árvores plantadas é responsável por 91% de toda a madeira produzida para fins industriais, contribuindo com 6,2% do PIB Industrial do País (IBÁ, 2017). A principal cultura florestal plantada é o eucalipto, atualmente em expansão quanto à abrangência de áreas em produção devido à substituição de outras espécies nos estados onde essa cultura não é tradicional (IBÁ, 2017), bem como pelo seu avanço para regiões marginais de cultivo, com condições de clima e de solo distintos daquelas onde se estabeleceram os primeiros plantios.

Apesar dos desafios apresentados durante o processo de adaptação do eucalipto no Brasil, tais como a formação de povoamentos em ampla diversidade climática e edáfica, incluindo-se solos frágeis, com baixa fertilidade natural e sob pressão de rotações sucessivas, foi possível um significativo aumento da sua capacidade produtiva ao longo dos anos, graças ao desenvolvimento científico associado, especialmente oriundo de programas de melhoramento genético e do aprimoramento de práticas silviculturais (Gonçalves et al., 2013). A literatura científica reporta saltos significativos na produtividade volumétrica nacional do eucalipto, com aumento do incremento médio anual (IMA) de $10 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, na década de 1960 (Gonçalves, 2014) para atuais 35 a $55 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ (ciclo de sete anos). Esses valores são superiores aos obtidos em países como África do Sul, Chile, Portugal e Espanha (SBS, 2008).

Espera-se que, cada vez mais, a manutenção ou o aumento dos níveis de produtividade dependam de inovações que tragam estratégias de adaptação aos desafios emergentes, como a rápida propagação de pragas e doenças, o uso de áreas menos favoráveis aos cultivos, o aumento dos custos de fertilizantes (Laclau et al., 2013), os riscos relacionados às alterações climáticas resultantes da emissão antropogênica de gases do efeito estufa (GEE) (Booth, 2013) e a aceitação da atividade em novos arranjos sociais. Esforços voltados à obtenção e à adoção de avanços tecnológicos, tais como a seleção de material genético adequado às diferentes condições ambientais, o manejo do ambiente nutricional das árvores e a adoção de práticas conservacionistas de solo poderão favorecer cada vez mais a produção florestal simultaneamente à manutenção de seus serviços ecossistêmicos. Neste capítulo são relatados alguns esforços da Embrapa, de seus parceiros e da comunidade científica visando a melhorias no estabelecimento de povoamentos florestais sob a ótica do manejo nutricional e sustentabilidade dos sítios de produção, discutindo-se a relação entre solo, plantas, condições de sítios e fatores de clima.

Ambiente nutricional do eucalipto no Brasil: avanços obtidos

Durante o processo de estabelecimento da cultura de eucalipto no Brasil, muitos reflorestamentos resultaram em plantios desuniformes, culminando em produtividades, em volume de madeira, aquém do esperado (Bertolla, 2013; Venturin et al., 2014). Dentre as dificuldades encontradas, são relatadas generalizações indevidas quanto à relação entre material genético, suas aptidões climáticas e edáficas, resultando em seleção de espécies ou procedências que se apresentaram posteriormente impróprias às áreas de plantio. Somaram-se a tais questões a escassez de informações científicas aplicadas aos diferentes ambientes e genótipos, resultando em falhas no planejamento do uso da terra, na seleção de técnicas de preparo do solo (Vilas Boas Rezende et al., 2011) e na aplicação insuficiente ou desbalanceada de fertilizantes (Bertolla, 2013). O uso intensivo do solo ao longo de sucessivas rotações, sobretudo em plantios estabelecidos em solos de baixa fertilidade, também foi um fator restritivo à obtenção de produtividades aceitáveis (Gonçalves et al., 2000), vindo a resultar, em muitas circunstâncias, na superexploração dos recursos do solo (Carmo et al., 1990).

Em atendimento a estas demandas, as principais linhas de pesquisa no Brasil envolvendo o eucalipto têm considerado como essencial realizar a adequação do manejo do solo, utilizando informações sobre a demanda nutricional dos povoamentos em diferentes estágios de desenvolvimento, sob condições distintas de aporte, manutenção, velocidade de fluxo e transferência de nutrientes entre os compartimentos do sistema florestal (Gonçalves, 2014), contemplados e contextualizados às condições de clima e de solo e ao material genético, conforme sintetizado adiante.

Demanda de nutrientes durante o desenvolvimento das árvores

Somada à disponibilidade hídrica (Novais; Barros, 1997; Stape et al., 2004, 2010), limitações quanto à oferta de nutrientes às plantas em determinados estágios podem comprometer significativamente o estabelecimento do povoamento e a produção final do eucalipto em volume de madeira. Informações sobre a demanda nutricional, em diferentes fases de desenvolvimento da cultura, e sobre a eficiência dos materiais genéticos em converter o material absorvido em biomassa, têm sido imprescindíveis para a adequação do manejo nutricional dos povoamentos florestais às diferentes condições de manejo.

Os estágios nutricionais das árvores são didaticamente divididos em antes e depois do fechamento das copas, conforme apresentado por Gonçalves et al. (2000) e ilustrado na Figura 1. Nela, são apresentadas mudas de *E. grandis* recém estabelecidas no campo, em fase de adaptação, quando sua eficiência em converter nutrientes em

Foto: Márcia Toffiani Simão Soares (A, B, C, E); Francisco Antônio Jurandir Bellote (D)



Figura 1. Aspecto de povoamentos florestais em diferentes estágios de desenvolvimento (A - E), com destaque para a dinâmica nutricional predominante em cada período. Em A e B, estágio inicial de desenvolvimento das árvores, com indicação de alocação de fotoassimilados para o desenvolvimento de raízes e copas. Em D, bandejas coletoras de folhas senescentes e, em E, detalhe da interface solo – serapilheira – raízes finas.

biomassa é menor (Figura 1A). Após essa fase, a habilidade em absorção, acúmulo de nutrientes e alocação da biomassa para formar copas e raízes aumenta, sendo comuns as respostas à fertilização nesse estágio de desenvolvimento (Figuras 1B e 1C). Após o fechamento das copas estabelece-se com maior intensidade a ciclagem biogeoquímica de nutrientes (Figuras 1D e 1E), quando a demanda de nutrientes pelas árvores é, em grande parte, atendida pela ciclagem interna e por nutrientes disponibilizados

pela serapilheira. O manejo dessa biomassa residual acima do solo pode, neste estágio, assumir vital importância para a promoção do uso racional de nutrientes no sistema solo-planta, oportunizando economia no uso de insumos, diminuição de perdas por emissões atmosféricas, de gases poluentes, por lixiviação e por outros processos que possuem potencial de contaminação do ambiente (Soares; Froufe, 2015).

Extração e exportação de nutrientes

A estimativa da extração e exportação de nutrientes pelos diferentes compartimentos das árvores (Figura 2) possibilita expressar a demanda de povoamentos florestais por recursos do solo (Bellote et al., 2000). Embora tais estimativas variem



Figura 2. Compartimentalização da biomassa aérea de *Eucalyptus* spp. para avaliação da extração e exportação de nutrientes: determinação da biomassa de folhas, galhos (A - C) e cascas (D e E).

em função de fatores ambientais, de manejo e genéticos (vide item Eficiência no uso de nutrientes e seleção de materiais genéticos), resultados obtidos em diferentes condições pedoclimáticas (Bellote et al., 1980; Poggiani et al., 1983, 1984; Faria et al., 2008; Santana et al., 2008) expressam o potencial da cultura em exportar quantidades muito maiores de nutrientes do que aquelas usualmente recomendadas via fertilização mineral (Tabela 1), o que justifica a preocupação com a manutenção da sustentabilidade da produção florestal ressaltada em diversos documentos científicos, por diferentes grupos de pesquisa atuantes no território brasileiro (GPTNFF, 1983; Silva et al., 1983a, 1983b; Ferreira, 1993; Bellotte et al., 2001; Andrade et al., 1995, 2011; Gonçalves, 2014; Souza et al., 2016).

Tabela 1. Nutrientes acumulados em diferentes compartimentos da árvore em povoamentos de *E. grandis* estabelecidos em Latossolo (1.500 árvores ha⁻¹), aos sete e 12 anos de idade.

Nutrientes	Idade das árvores (anos)	Componentes das árvores (kg ha ⁻¹)				Total
		Alburno	Cerne	Casca	Copa	
N	7	126,8	78,0	59,3	253,5	517,6
	12	116,9	81,7	53,3	211,3	463,2
P	7	8,6	0,4	3,8	13,2	26,0
	12	16,6	-	14,0	15,8	45,9
K	7	123,4	17,5	55,2	77,5	274,2
	12	64,0	5,4	37,8	126,4	233,6
Ca	7	37,0	22,9	97,6	53,8	211,3
	12	23,0	14,1	98,0	79,0	214,1
Mg	7	21,7	8,8	39,2	36,0	105,9
	12	12,3	3,7	14,3	23,6	53,9

Fonte: Bellote et al. (2001).

As informações constantes na Tabela 1 indicam que a colheita apenas do lenho, por exemplo, pode representar expressiva redução na exportação de nutrientes do sítio florestal, conforme também apontado por Santana et al. (2008) para povoamentos estabelecidos em diferentes regiões do Brasil.

Eficiência no uso de nutrientes e seleção de materiais genéticos

O conceito de eficiência das plantas no uso de nutrientes abrange os processos de absorção, translocação, acúmulo e uso destes para a produção de matéria seca ou grãos, em condições nutricionais normais ou adversas (Pozza et al., 2009). Uma ferramenta voltada à nutrição florestal para a avaliação da eficiência nutricional das plantas é a obtenção da “eficiência no uso dos nutrientes” (EUN), que expressa a

quantidade de matéria orgânica que é produzida a cada unidade de nutriente que é absorvido pela planta (Chapin III, 1980), refletindo a eficiência da planta em converter nutriente em biomassa. A EUN permite identificar, entre as espécies estudadas, aquelas que proporcionem maior produção de biomassa com um menor requerimento de nutrientes (Vítousek, 1982; Silva et al., 1983b), possibilitando, desta forma, uma economia de insumos e menor pressão sobre o estoque de nutrientes disponíveis no solo.

Documentos publicados nos últimos 40 anos, em condições tropicais, evidenciam a existência de significativas diferenças na produção de biomassa e na eficiência nutricional entre genótipos de eucalipto (Silva et al., 1983a, 1983b; Pinto et al., 2011; Oliveira, 2017), quanto à eficiência de absorção, translocação e utilização de nutrientes em relação aos diferentes materiais genéticos, bem como em função do nutriente avaliado (Pinto et al., 2011).

Na Tabela 2 estão apresentados os índices de eficiência de utilização de nutrientes (EUN) para o lenho e casca, em solo de baixa fertilidade natural, obtidos por Silva et al. (1983b), a partir de um ensaio envolvendo *E. grandis*, *E. saligna*, *E. propinqua*, *E. dunnii* e *E. robusta*, com dez anos de idade, no estado de São Paulo. Nas condições de estudo, para produção do lenho, o fósforo (P) é o elemento mais eficientemente utilizado por todas as espécies, seguido pelo magnésio (Mg), potássio (K), nitrogênio (N) e cálcio (Ca). Dentre as espécies, *E. grandis* destacou-se pela alta eficiência de utilização de P e K, produzindo 43.441 kg kg⁻¹ P utilizado de valor de biomassa do lenho e 3.776 kg kg⁻¹ P utilizado de casca. Conforme os autores, a alta eficiência no uso de nutrientes reflete sua menor exigência nutricional, o que é um aspecto desejável

Tabela 2. Índice de eficiência de utilização de nutrientes para produção de biomassa no lenho e casca, em cinco espécies de *Eucalyptus*.

Espécie	Biomassa Mg ha ⁻¹	kg de biomassa produzida/kg de nutriente utilizado				
		N	P	K	Ca	Mg
Lenho						
<i>E. grandis</i>	160,3	1250	43441	1639	606	2083
<i>E. saligna</i>	168,7	883	26380	1389	532	2326
<i>E. propinqua</i>	85,7	883	10645	769	694	4348
<i>E. dunnii</i>	125,6	1316	18858	901	474	3030
<i>E. robusta</i>	117,4	633	11365	869	559	4000
Casca						
<i>E. grandis</i>	23,3	345	3776	333	327	1031
<i>E. saligna</i>	15,5	268	3846	299	151	426
<i>E. propinqua</i>	17,5	332	4070	446	578	729
<i>E. dunnii</i>	14,9	580	6878	408	356	1099
<i>E. robusta</i>	16,7	446	3584	382	316	495

Fonte: Silva et al. (1983b), adaptado.

quanto ao uso de recursos naturais. Os dados também ilustram a possibilidade de variação da eficiência de utilização de nutrientes entre distintos materiais genéticos, bem como em função do nutriente avaliado, o que também corrobora com os resultados obtidos em outras condições pedoclimáticas (Morais et al., 1990; Molica, 1992; Faria et al., 2008; Oliveira, 2017).

Técnicas de preparo do solo e a capacidade de resiliência das florestas plantadas

As plantações de eucalipto, comparativamente às culturas agrícolas, podem beneficiar o funcionamento biológico, físico e químico do solo sob diversos aspectos, estabelecendo, de acordo com o manejo, uma forte interação floresta-solo (Gonçalves, 2014, vide item Fertilidade e nutrição do eucalipto em simbiose com micorrizas). O preparo do solo para plantio compreende uma etapa de crucial importância para a manutenção da estabilidade e resiliência do sistema florestal (Gonçalves, 2002). Práticas inadequadas de manejo do solo, por outro lado, podem comprometer substancialmente a qualidade do sítio, ocasionando menor resistência das plantas e provocando diminuições no crescimento e na produtividade florestal (Bellote et al., 2008a).

O preparo do solo tem como objetivo melhorar suas condições para o desenvolvimento do sistema radicular, a fim de aumentar o volume explorado pelas raízes, favorecendo a sustentação, o transporte e a absorção de água e de nutrientes pelas plantas. Gonçalves et al. (2000) agrupam os métodos de preparo do solo em duas classes: (i) cultivo intensivo do solo, que contempla amplo revolvimento de suas camadas superficiais, com incorporação total ou parcial dos resíduos culturais ou, alternativamente, queima dos resíduos culturais para a facilitação dos implementos de preparo do solo, e (ii) o cultivo reduzido do solo (cultivo mínimo), que prevê a realização de um preparo localizado apenas na linha ou na cova de plantio. Este último método possibilita a manutenção da maior parte dos resíduos culturais sobre a superfície do solo, o que inclui a serapilheira, galhos, ponteiros, folhas deixadas pós-colheita e, dependendo do método de colheita, cascas oriundas da remoção da madeira no campo (Figura 3). As técnicas de preparo mais conservacionistas apresentaram boa aderência e difusão pelo setor florestal brasileiro nas últimas décadas, em reflexo à demanda multissetorial pela associação entre produtividade e sustentabilidade ambiental. Neste tocante, desde a década de 1980 a Embrapa vem contribuindo com o estudo comparativo de sistemas e práticas de manejo do solo em diferentes regiões do Brasil, em atendimento à adequação regionalizada das operações florestais.

Além de se constituir em um importante reservatório de nutrientes (vide item Extração e exportação de nutrientes), conservar os resíduos da colheita na superfície do solo traz uma série de benefícios ao sistema produtivo, tais como a redução da erosão, a conservação da umidade (Cavichiollo et al., 2004; Dedecek et al., 2007) e a

Fotos: Márcia Toffiani Simão Soares

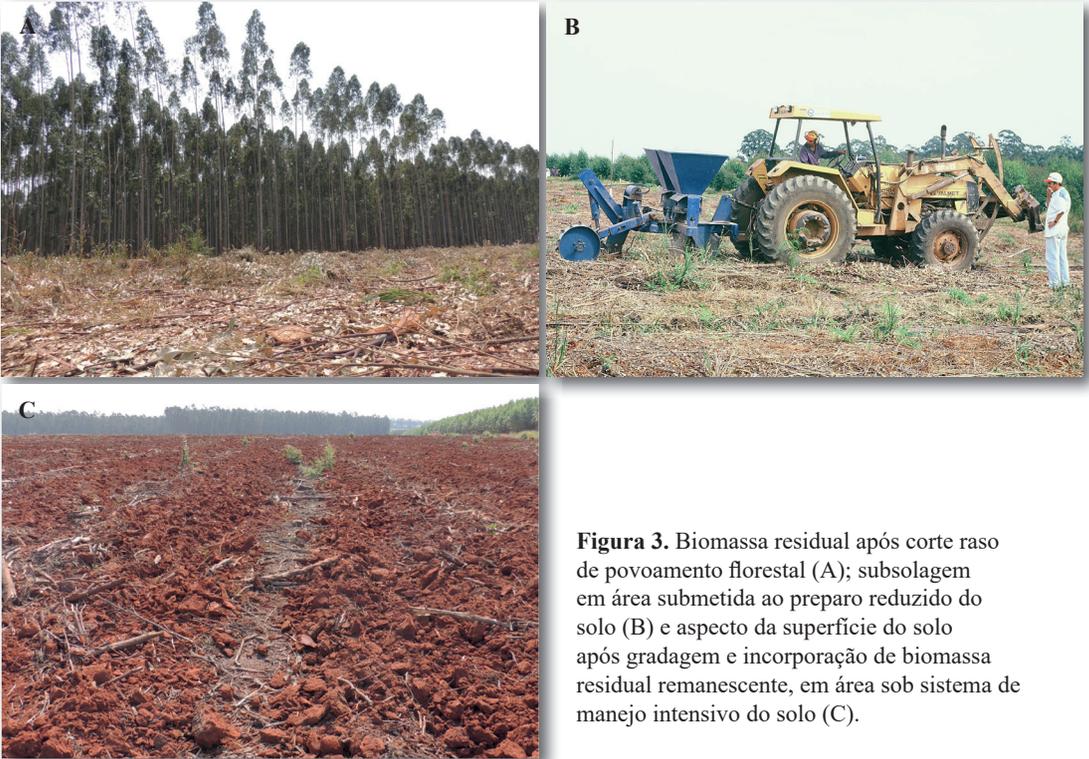


Figura 3. Biomassa residual após corte raso de povoamento florestal (A); subsolagem em área submetida ao preparo reduzido do solo (B) e aspecto da superfície do solo após gradagem e incorporação de biomassa residual remanescente, em área sob sistema de manejo intensivo do solo (C).

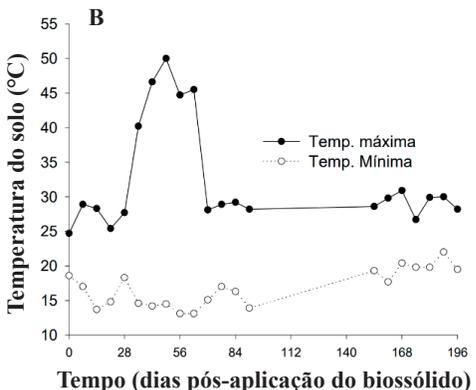
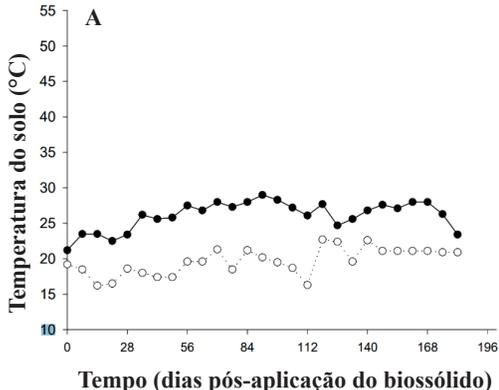


Figura 4. Temperaturas mínima e máxima do solo (a 5 cm de profundidade) com (A) e sem (B) serapilheira sobre a superfície.

Fonte: Soares (2003).

regulação da temperatura do solo (Soares, 2003). Na Figura 4 é apresentada a variação de temperatura em plantios de eucalipto nos estágios iniciais de desenvolvimento, sob mesma classe de solo e condições climáticas, diferindo quanto à presença de serapilheira, com diferença entre sítios superior a 20 °C. Diversos processos de transferência de nutrientes são alterados nas condições de altas temperaturas do solo, tais como o aumento da atividade da urease, com o consequente aumento das taxas de volatilização do N-NH₃ (Silva et al., 2017).

É importante salientar que o crescimento inicial de povoamentos florestais estabelecidos no método de cultivo mínimo do solo, em muitas situações, se apresenta mais lento e heterogêneo do que aquele observado no método de cultivo intensivo do solo (Gonçalves et al., 2000). Os fatores para essa eventual vantagem inicial sob cultivo intensivo são apresentados por Cavichiolo et al. (2004), a partir dos resultados obtidos em área de rebrota de *E. saligna* sob Latossolo Vermelho textura argilosa, pertencente à Cia. Suzano de Papel e Celulose, no município de São Miguel Arcanjo, SP. Nesse estudo, os autores verificaram maior incremento do diâmetro à altura do peito (DAP) das árvores em solo revolvido (submetido à gradagem) nas entrelinhas da rebrota em relação ao controle (sem revolvimento), com aumento nas concentrações de K no solo e no tecido foliar. Segundo os autores, o revolvimento do solo, bem como a alteração da porosidade do solo podem proporcionar maior contato e reação da matéria orgânica contida nos restos da colheita, serapilheira e fertilizantes, resultando em uma série de benefícios ao ambiente nutricional das plantas, como melhores condições de desenvolvimento das raízes e estímulo à mineralização da matéria orgânica e disponibilização de nutrientes às plantas. Todavia, Cavichiolo et al. (2003) reportaram, para a mesma espécie em Latossolo Amarelo textura média em Itatinga (SP), menor produtividade da rebrota sob gradagem, fato explicado pelo aumento da evaporação de água do solo, afetando o aproveitamento dos nutrientes pelas plantas. Os benefícios de médio e longo prazos associados ao estabelecimento de cultivo mínimo do solo estão também elucidados nos resultados das pesquisas desenvolvidas na região Sudeste do Brasil pela Embrapa Florestas, em parceria com o Centro Internacional de Investigação Florestal (CIFOR) e a International Paper, em plantio comercial de *E. grandis* sob diferentes tipos de manejo de resíduos florestais (Dedecek et al., 2007; Bellote et al., 2008a), ressaltando a importância da escolha do adequado manejo de resíduos, associado à reposição de nutrientes para a sustentabilidade florestal (Bellote et al., 2008a).

Demandas e desafios para o manejo da fertilização

Avaliação da adequação do estado nutricional das plantas

A avaliação da adequação do estado nutricional das plantas constitui-se em um dos grandes desafios de pesquisa em nutrição de plantas, sendo a busca por métodos eficientes objeto de diversas pesquisas, a fim de adequar técnicas e processos às diferentes condições de clima, solo e nível tecnológico adotado. A avaliação da necessidade de fertilização emprega, geralmente (i) a análise química do solo, (ii) a análise foliar, (iii) o diagnóstico de sintomas visuais de deficiência nutricional e (iv) ensaios de campo. A avaliação das respostas da planta à fertilização via ensaios de campo, em solos representativos e com condições semelhantes às áreas de plantio extensivo é considerada como o método ideal para a recomendação de fertilização, embora oneroso e geralmente restrito às instituições públicas de pesquisa e empresas florestais, visto a sua complexidade de execução (Gonçalves, 2014).

Atualmente, as análises de solo e de tecido vegetal são os principais métodos utilizados para esse objetivo, dada à praticidade e ao menor custo, possibilitando intervenções nos povoamentos em tempo hábil, quando necessário. Atualmente, estão disponíveis tabelas de interpretação de análise do solo para a recomendação de fertilizantes para as principais espécies florestais quanto à importância econômica, conforme apresentado por Raij et al. (1996), Ribeiro et al. (1999), Bellote e Neves (2001), Bellote et al. (2008b), Prezotti et al. (2007), Pauletti e Motta (2017). Nessas recomendações, todavia, fatores locais e circunstanciais como variações na temperatura e umidade do solo e interações com microorganismos não são levados em consideração na interpretação dos resultados, podendo limitar a eficiência do método em avaliar a disponibilidade e a absorção de nutrientes pelas plantas.

Complementarmente à análise de solo, as técnicas de diagnóstico de sintomas visuais de deficiência nutricional e a análise foliar consideram que os conteúdos dos nutrientes da planta refletem, assim como a fertilidade do solo, seu estado nutricional (Bellote; Silva, 2000). A diagnose do estado nutricional com base na análise foliar consiste em comparar os resultados analíticos de uma amostra com um padrão de referência, que normalmente é obtido de uma planta ou uma população de plantas de alta produtividade, portanto, sem deficiência de nutrientes. A produtividade das plantas depende da disponibilidade em níveis adequados de fatores de produção, que podem ser agrupados em fatores climáticos (radiação solar, temperatura e precipitação pluvial – disponibilidade hídrica), edáficos (profundidade efetiva do solo, aeração, oferta de água e nutrientes, susceptibilidade à erosão, pedregosidade, por exemplo) e bióticos (potencial genético, pragas, doenças e plantas invasoras). Dessa forma,

plantas adequadamente nutridas podem exteriorizar todo seu potencial produtivo desde que não ocorram restrições relacionados a outros fatores de produção.

A análise de tecidos é um método mais direto para a avaliação do estado nutricional das plantas, comparada à análise de solo. Todavia, seu uso e interpretação demandam esforços voltados à padronização da amostragem, considerando-se fatores como localização do plantio (solo e clima), época de amostragem, espécie/genótipo amostrado, idade, estágio fisiológico da planta e posição da amostra na copa da árvore (Bellote; Silva, 2000), a fim de minimizar variações nos teores de nutrientes dos tecidos avaliados.

A interpretação das informações obtidas nas análises de tecido foliar, assim como do solo, comumente é feita com base em tabelas de níveis ou faixas de teores, as quais normalmente são desenvolvidas a partir de estudos de calibração, que relacionam teores de nutrientes e produtividade. Por esses métodos, teores de nutrientes abaixo ou acima dos valores ou faixas críticas estão associados com baixo crescimento vegetativo, rendimento ou qualidade do produto obtido. Tais procedimentos podem apresentar restrições por focarem na interpretação de cada nutriente de forma isolada, desconsiderando as relações entre os mesmos e, dessa forma, o equilíbrio nutricional.

Dentre as estimativas por modelos matemáticos, o Sistema Integrado de Diagnóstico e Recomendação (DRIS) desenvolvido por Beaufils (1973) representou um avanço na forma de interpretação dos dados analíticos de tecidos de plantas, por considerar as relações entre os nutrientes e o equilíbrio nutricional na planta. Esse método expressa os resultados da diagnose nutricional por meio do índice DRIS, que representa o efeito de cada nutriente no estado nutricional da planta, numa escala contínua. Tais índices podem apresentar valores positivos ou negativos, indicando, respectivamente, excesso ou falta do nutriente e, quanto mais próximo de zero, melhor o estado nutricional (Walworth; Sumner, 1987; Beverly, 1991). Esse sistema é considerado por muitos autores como sendo mais preciso que os métodos do nível crítico ou da faixa de suficiência na detecção de deficiências ou excessos nutricionais, por considerar o balanço nas relações entre nutrientes. A obtenção das normas ou valores de referência do DRIS, bem como a operacionalização deste sistema requer, todavia, o uso de um banco de dados com resultados analíticos de teores foliares de nutrientes de uma população de amostras padronizadas, com informações sobre a produtividade de biomassa do fuste, quanto à idade da planta e posição de coleta das amostras.

Com o intuito de melhorar a capacidade diagnóstica do DRIS, modificações foram propostas com relação à forma de obtenção das normas ou valores de referência e na forma de cálculo do índice do DRIS apresentada por Beaufils (1973) e na interpretação desses índices (Jones, 1981; Elwali; Gascho, 1984; Wadt et al., 1998, 1999). No Brasil, o sistema DRIS foi estudado em diversas culturas, entre as quais o arroz (Guindani et al., 2009), feijão (Mesquita et al., 2018), soja (Maeda, 2002; Kurihara, 2004; Kurihara, et al., 2014), macieira (Nachtigall; Dechen, 2007), algodoeiro (Kurihara et al., 2014),

girassol (Lantmann et al., 2003), cafeeiro (Bataglia et al., 2004), pinus (Maeda et al., 2011), e eucalipto (Wadt et al., 1998a, 1998b, 1999a, 1999b, 1999c; Wadt; Novais, 1999, Silva et al., 2004; Wadt, 2004). Para o híbrido *E. grandis* x *E. urophylla*, valores e normas de referência preliminares do DRIS, utilizados para os cálculos dos dos seus respectivos índices, foram apresentados por Wadt et al. (1999c). Wadt (2004), ao avaliar o estado nutricional de oito clones de *E. grandis*, com idade de 1,0 e 4,7 anos, cultivados em dois solos (Neossolo Quartzarênico e Argissolo Vermelho Amarelo), verificaram maior coerência para o padrão nutricional pelo método DRIS em comparação ao do nível crítico.

Os resultados favoráveis para eucalipto e outras culturas apontam para a necessidade de se ampliar a pesquisa em diferentes condições de solo, clima, idade e material genético para fins de aprimoramento e, posteriormente, validação da técnica em condições reais de cultivo.

Manejo da fertilidade do solo e associações simbióticas em florestas

A introdução ou manejo de organismos do solo mediadores dos ciclos do C e nutrientes pode trazer uma série de benefícios sob o aspecto produtivo e quanto à manutenção ou aumento da resiliência dos ambientes florestais. Neste contexto, estudos sob condições tropicais em plantios mistos com *Eucalyptus* spp. e espécies arbóreas fixadoras de N₂ têm resultado em importantes informações voltadas à capacidade de armazenamento de C e o potencial de reposição de N do solo removido por sucessivas rotações (Bernhard-Reversat, 1996; Parrotta, 1999; Corbeels et al., 2005; Forrester et al., 2005; Laclau et al., 2010; Voigtlaender et al., 2012; Bouillet et al., 2013; Santos et al., 2017; Tchichelle et al., 2017), com ganhos adicionais em madeira e o estabelecimento de diversos outros serviços ecossistêmicos (Balieiro et al., 2020b). As associações entre fungos micorrízicos e raízes de eucalipto também têm atraído a atenção da comunidade científica, com resultados importantes quanto à compreensão da interação hospedeiro-fungo em diferentes condições ambientais e estágios de desenvolvimento da cultura (Auer; Bettiol, 1986; Trindade et al., 2001; Carvalho; Amazonas, 2002; Pagano; Scotti, 2008; Faria et al., 2017). Os principais resultados obtidos pela Embrapa e comunidade científica quanto aos benefícios destas associações simbióticas em plantios eucalipto são sintetizados a seguir.

Uso de leguminosas arbóreas fixadoras de nitrogênio

Dentre as relações envolvendo microorganismos e plantas, os processos de simbiose envolvendo leguminosas e bactérias fixadoras de nitrogênio nodulíferas (“rizóbio”) apresentam grande interesse técnico e científico, por sua importância econômica em diferentes sistemas de produção. Esta simbiose se caracteriza pela

formação de estruturas hipertróficas nas raízes e, excepcionalmente, no caule, denominadas nódulos, onde ocorre a fixação biológica do nitrogênio atmosférico (FBN) (Moreira; Moreira, 2006).

Das espécies de leguminosas arbóreas introduzidas no Brasil, que se associam a bactérias fixadoras de N_2 (diazotróficas), a *Acacia mangium* Wild. tem atraído a atenção da comunidade científica nacional pelo seu rápido crescimento, sua adaptação às mais variadas condições edafoclimáticas (Balieiro et al., 2004, 2018), pela possibilidade de uso múltiplo na propriedade rural, pela sua capacidade de fixação de N_2 atmosférico e de estabelecimento de relações simbióticas com fungos micorrízicos, o que facilita seu desenvolvimento em solos pobres em nutrientes e matéria orgânica (Franco et al., 1995; Garay et al., 2003; Bouillet et al., 2013). Segundo Brockwell et al. (2005), as taxas de FBN observadas em condições de campo para as espécies do gênero *Acacia* arbustivas e arbóreas variam de 2% a até 90% do nitrogênio acumulado na biomassa da planta, corroborando com achados exclusivos no Brasil (0-70%) (Bouillet et al., 2008; Paula et al., 2018; Faria et al., 2020). Essa amplitude ocorre por fatores relacionados à idade e qualidade de sítio, à variabilidade genética dentro do gênero *Acacia* e à capacidade do gênero em nodular, em associação com um largo espectro de espécies de “rizóbio”, resultando em uma eficiência simbiótica variável. Alguns aspectos relacionados aos benefícios da introdução de leguminosas arbóreas em monocultivos de eucalipto estão relacionados adiante.

- Plantios mistos x produção de madeira para fins energéticos ou industriais

Diversos estudos apontam que o fornecimento de madeira para fins energéticos ou industriais (papel e celulose) por meio de plantios mistos de *Eucalyptus* spp. e espécies fixadoras de N_2 (sem adubação nitrogenada) podem atingir níveis similares ou mesmo maiores do que algumas monoculturas de eucalipto (Binkley et al., 1992; Kaye et al., 2000, Forrester et al., 2013; Koutika et al., 2014; Santos et al., 2016), embora esse fato não seja generalizado, variando em função das condições de clima e de solo. Em uma meta-análise realizada por Marron e Epron (2019) com 148 estudos de caso, os autores verificaram que os plantios mistos de espécies florestais são, em média, 18% mais produtivos do que cultivos monoespecíficos não fixadores de N_2 , sendo este efeito significativo sob condições temperadas (24% mais produtivos), mas não em condições tropicais (12% mais produtivos). Os autores atribuíram os resultados obtidos à menor disponibilidade de N assimilável, geralmente verificada em solos de clima temperado. Além das respostas das espécies serem, de modo geral, sítio-específica, estes resultados também sugerem a ocorrência de uma mudança de partição do carbono fixado em raízes, em detrimento da parte aérea, o que pode, em algumas situações, desfavorecer a produção nos plantios estabelecidos em condições tropicais, com solos geralmente mais pobres e ácidos (Nouvellon et al., 2012; Epron et al., 2013). Santos et al. (2016), ao analisarem dados de uma rede de experimentos com

Eucalyptus e *A. mangium*, incluindo cinco sítios de plantio no Brasil, verificaram que a produção global de madeira em plantios mistos foi maior apenas onde os solos eram mais oligotróficos (arenosos) e onde o clima apresentava temperatura média anual superior a 24 °C, quando a condição se torna propícia ao crescimento de *A. mangium*. Incrementos médios anuais de madeira na colheita (aos seis anos de idade) em plantios puros de *Eucalyptus* spp. (100E) e *A. mangium* (100A) e misto (50A: 50E), no Brasil e no Congo, são sintetizados na Tabela 3, em que se atesta o comentário anterior, no qual pode se verificar a possibilidade de aumento do IMA em plantações mistas (50A: 50E) em locais de solos mais arenosos ou pobres, quando comparadas às plantações puras de eucalipto (Nouvellon et al., 2012; Santos et al., 2016).

Tabela 3. Incrementos médios anuais (IMA) de madeira na colheita (aos seis anos de idade) em plantios puros de *Eucalyptus* spp. (100E), *A. mangium* (100A) e plantios mistos com essas duas espécies (50A: 50E), em diferentes sítios florestais.

Local do plantio	<i>Eucalyptus</i> spp. (100E)	<i>A. mangium</i> (100A)	<i>A. mangium</i> + <i>Eucalyptus</i> spp. (50A: 50E)	Fonte
	IMA (Mg ha ⁻¹ ano ⁻¹)			
Brasil				
Itatinga, SP (USP)	18,2	10,5	14,7	Bouillet et al. (2013)
Luis Antônio, SP (I. Paper)	21,8	4,8	18,4	Bouillet et al. (2013)
Bofete, SP (Suzano)	21,1	11,5	18,9	Bouillet et al. (2013)
Seropédica, RJ*	15,8	11,4	18,3	Santos et al. (2016)
Congo*	7,6	6,5	9,9	Nouvellon et al. (2012)

* Sítios com solos muito arenosos.

- Deposição de N e decomposição da serapilheira

Pesquisas recentes têm evidenciado que, em sistemas estabelecidos nos trópicos com uso de leguminosas arbóreas fixadoras de N₂, a deposição de N via serapilheira pode sofrer um aumento de até 42% quando comparado com plantios monoespecíficos, evidenciando o potencial deste sistema em substituir parcial ou totalmente a adubação nitrogenada (Balieiro et al., 2020a, Figura 5).

Embora as espécies fixadoras de N₂ frequentemente possuam concentrações maiores de N em seus tecidos, tal característica não garante taxas mais elevadas de decomposição de seus resíduos (Gartner; Cardon, 2004). As melhorias esperadas com a introdução de espécies arbóreas fixadoras de N₂ na decomposição dos resíduos, na atividade microbiana e na liberação de nutrientes (especialmente N), estão condicionadas pela qualidade química e estrutural da biomassa que formará a serapilheira (Novotny et al., 2013; Bachega et al., 2016; Santos et al., 2018), e a atuação conjunta dos microrganismos advindos de cada resíduo, impulsionando a sua decomposição

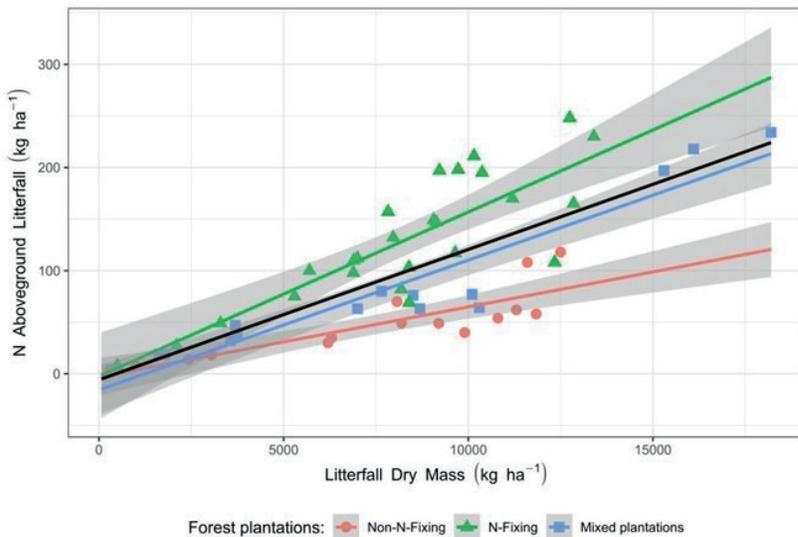


Figura 5. Gráfico de dispersão entre a massa de serapilheira depositada e N, a entrada de N via serapilheira (kg ha^{-1}) em plantios puros de leguminosas fixadoras de N_2 atmosférico (“ N_2 -fixing”), de não leguminosas (“Non- N_2 -fixing”) e plantios mistos (“Mixed plantations”). Dados de $n = 53$ de estudos com plantios mistos. A linha preta representa a regressão linear independente do plantio ($r^2 = 0,60$, $p < 0,001$). A linha vermelha de regressão (círculos) indica as espécies não leguminosas e não fixadoras de N_2 , a linha azul (quadrados) representa os plantios mistos com densidade equivalente de plantas, mas metade com leguminosas fixadoras de N_2 e outra metade não leguminosas e não fixadoras (E50: A50) e linha verde (triângulo) representam os plantios com leguminosas fixadoras de N_2 . A sombra representa o erro padrão de cada tratamento avaliado.

Fonte: Balieiro et al. (2020a).

(Forrester et al., 2006; Rachid et al., 2015; Santos et al., 2018). Bacheaga et al. (2016), por exemplo, verificaram que a decomposição de folhas e raízes finas de acácia eram marcadamente mais lentas que a de resíduos de eucalipto, apesar das maiores concentrações iniciais de N e P em ambos os tecidos da acácia (respectivamente 1,9 e 1,5 vezes maior para folhas e 2,9 e 3,3 vezes para raízes). Os autores atribuem as baixas taxas de decomposição verificadas à qualidade do C disponível nas florestas plantadas em condições tropicais, dentre outros fatores, conferindo uma condição mais desfavorável à atividade microbiana. Importante salientar que a infinidade de alternativas de espécies com potencial diazotrófico e de condições de plantio requerem a ampliação dos esforços de pesquisa voltados ao manejo de plantios mistos em diferentes sítios florestais.

- Modificações na fertilidade do solo

Espécies leguminosas que se associam a bactérias diazotróficas normalmente acidificam o solo rizosférico, pela extrusão diferenciada de H^+ e liberação de ácidos

orgânicos e fosfatases ácidas, como uma estratégia de solubilizar fosfatos do solo (Raven et al., 1990; Vance, 2001; Venterink, 2011). Assim, com o avanço da idade dos plantios, verifica-se uma forte tendência à diminuição do pH e das concentrações de P disponível no solo. Estudos voltados à lógica de adubação desses plantios devem considerar seguir minimamente a regra da reposição do que é exportado, com atenção às outras possibilidades de perda de nutrientes por erosão, lixiviação, desnitrificação, dentre outros processos, buscando compensá-las.

- Modificações nos estoques de C do solo

As plantações de eucalipto apresentam um potencial para o aumento do C do solo, especialmente se precedido por pastagens degradadas (Lima et al., 2006). A introdução de leguminosas associadas a bactérias diazotróficas às monoculturas de eucalipto tem ganhado expressão nos últimos anos, devido ao aumento dos estoques de C no solo constatado em alguns desses plantios (Kaye et al., 2000; Balieiro et al., 2008; Forrester et al., 2013). Este efeito tem sido parcialmente atribuído ao incremento de C em compartimentos mais lábeis da matéria orgânica do solo, em plantios mistos e puros de *A. mangium*, muito provavelmente pela baixa velocidade de decomposição de seus resíduos (Bini et al., 2013; Koutika; Mareschal, 2017). Este fenômeno não pode ser generalizado, pois condições abióticas locais e manejo florestal podem trazer restrições significativas para o aumento efetivo de C no solo (Chaer; Tótola, 2007; Fialho; Zinn, 2014; Cook et al., 2016). Espécies e arranjos de plantio devem ser adaptados às condições distintas de plantio, para assegurar a manutenção ou sequestro de C em solos que recebem plantios mistos.

Fertilidade e nutrição do eucalipto em simbiose com micorrizas

As associações entre fungos micorrízicos e raízes podem conferir às plantas uma série de vantagens adaptativas à sua sobrevivência, desenvolvimento e tolerância a estresses, tais como o aumento na produção de enzimas antioxidantes (Wu; Zou, 2009), alteração dos níveis hormonais e mudanças na condutância estomática, aumento do conteúdo de água dos tecidos vegetais, dos teores de clorofila e das taxas fotossintética (Zhu et al., 2012; Frosi et al., 2016) e transpiratória (Harris-Valle et al., 2009; Zhu et al., 2012; Santander et al., 2017). Essas associações podem possibilitar, ainda, maior longevidade das raízes (Eissenstat et al., 2000) e melhor absorção de nutrientes (Marschner; Dell, 1994; Silva et al., 2007), principalmente P (Trajano et al., 2001). Quanto aos processos envolvendo a ciclagem de nutrientes, o micélio fúngico pode favorecer a mineralização da matéria orgânica do solo (Paterson et al., 2016), facilitar a aquisição de nutrientes pelo hospedeiro (Bender et al., 2015; Thirkell et al., 2016), e melhorar o ambiente nutricional do solo pela formação de agregados mais estáveis (Dai et al., 2015; Qin et al., 2017) e mais aptos a trocas de água e ar entre solo e raízes (Al-Kaisi et al., 2014), com a liberação de seu exsudato, a glomalina (Kohler

et al., 2017). Todos estes aspectos são desejáveis para melhoria da qualidade morfofisiológica de mudas de espécies florestais produzidas em viveiro (Soares et al., 2017; Souza et al., 2017) e para garantir melhores condições de sobrevivência e desenvolvimento das árvores no campo (Mello et al., 2009; Zong et al., 2015).

Os fungos ectomicorrízicos são comuns em povoamentos de eucalipto, sendo a formação simbiótica com este grupo de microrganismos requerida para a sobrevivência de muitas espécies de árvores, incluindo as comercialmente importantes como *Pinus* spp. e *Eucalyptus* spp. (Carvalho; Amazonas, 2002, Mello et al., 2009). Embora as associações com fungos ectomicorrízicos sejam as mais estudadas (Mello et al., 2006), vários autores descrevem também a ocorrência da associação de espécies do gênero com endomicorrizas (Santos et al., 2001; Gange et al., 2005; Pagano; Scotti, 2008; Pagano et al., 2009).

No semiárido mineiro, Pagano et al. (2009) avaliaram a colonização micorrízica nas raízes de plantas de *E. camaldulensis* e *E. grandis*, associando-as ao crescimento e ao teor de nutrientes em cada espécie. Os autores observaram que ambas as espécies apresentaram colonização por ectomicorrizas, sendo que as raízes de *E. camaldulensis* também apresentaram colonização por hifas e vesículas, sugerindo a ocorrência de endomicorrizas da família Glomeraceae. Quanto ao aspecto nutricional, os autores relacionaram os maiores teores de nutrientes (especialmente N e P) observados na biomassa seca de *E. grandis* à ocorrência de ectomicorrizas, sugerindo que os abundantes basidiocarpos (provavelmente pertencente ao fungo *Pisolithus* sp.), especialmente nas áreas sob *E. grandis*, poderiam permitir a absorção de fósforo e outros nutrientes. Bini et al. (2018) observaram que o consórcio entre *E. grandis* e *Acacia mangium*, sob condições tropicais e com idades entre sete e vinte meses, estimulou a colonização das raízes de *E. grandis* com fungos micorrízicos arbusculares (FMA), bem como a atividade da enzima fosfatase no solo, possibilitando a aceleração da ciclagem de nutrientes na floresta. Recente estudo realizado por Robin et al. (2018) identificou, para uma plantação de *E. grandis* com cinco anos de idade no Brasil e ambiente com mais de 80% da comunidade fúngica representado pelo fungo *Pisolithus* sp., hifas alcançando profundidade de até 4 m. Tais informações reforçam a necessidade do melhor conhecimento da interação plantas e microrganismos para se avançar no manejo químico de solos sob florestas, considerando sua complexidade ecológica.

Manejo dos povoamentos florestais sob estresses climáticos

A literatura científica tem reportado o comprometimento potencial ou real da atividade florestal por diferentes estresses climáticos, tais como ventos (Braz et al., 2014), tempestades severas, chuvas de granizo, estiagens (Gonçalves et al., 2017) e geadas (Paludzyszyn Filho et al., 2006; Wrege et al., 2018), que chegam a causar

prejuízos irremediáveis em povoamentos inteiros (Mitchell, 2013; Ataíde et al., 2015). Os riscos associados às variações de clima poderão aumentar a vulnerabilidade de povoamentos florestais em todo o mundo (Wu et al., 2011), podendo provocar decréscimo na produtividade do eucalipto (Baesso et al., 2010), com prejuízos ao consumo e ao comércio internacional de produtos de madeira (Perez-Garcia et al., 2002).

Apesar das incertezas em relação à magnitude das possíveis mudanças quanto à frequência de extremos climáticos, é certo que práticas silviculturais poderão ser ajustadas a fim de aumentar a resiliência dos plantios, conforme descrito adiante.

Convivência com o estresse hídrico

O levantamento de informações referentes à disponibilidade hídrica em povoamentos florestais vem atraindo atenção considerável de diversas equipes de pesquisa nas últimas décadas (Wrege et al., 2009, 2011; Souza et al., 2014), em função de prejuízos na produção por secas e estiagens, e devido à preocupação com o estabelecimento de conflitos relacionados à partição da água consumida pelos diferentes setores da sociedade (Lima; Zakia, 2006). A expansão da eucaliptocultura no Brasil para regiões com menor disponibilidade de água, como é o caso do Cerrado (Souza et al., 2014) e da Caatinga (Wrege et al., 2011), ou com maior disponibilidade, como é o caso da região Norte, traz desafios novos quanto ao funcionamento fisiológico das plantas sob tais estresses e diferentes condições de manejo.

A maioria dos plantios comerciais de eucalipto está estabelecida em regiões com déficit hídrico (Figuras 6 e 7) e, ou de nutrientes em diferentes graus. Solos com maior profundidade efetiva ou clones com raízes mais profundas tendem a ser mais produtivos (Stape et al., 2002), sendo a seleção de genótipos tolerantes/resistentes à seca (Paludzyszyn Filho et al., 2013), um procedimento imprescindível às regiões com estiagens severas.

Estratégias que favorecem os povoamentos florestais em seus processos vinculados ao ciclo da água no sistema podem ser incluídas no planejamento das atividades silviculturais, como a seleção de áreas, de acordo com zoneamentos climáticos estabelecidos na região de produção, a subsolagem (Stape et al., 2002), a definição de épocas mais favoráveis para o plantio, a adoção de práticas conservacionistas tais como o menor revolvimento do solo e a manutenção da biomassa residual sobre o piso florestal, que visam promover a manutenção de boas condições físicas do solo, a redução de perdas por evaporação, a manutenção de processos de transferência de nutrientes à planta como fluxo de massa e de difusão e o desenvolvimento do sistema radicular das árvores abundante e profundo.

Soma-se às práticas acima citadas a flexibilização do calendário de adubação, conforme o regime de chuvas da região, com a revisão das fontes de nutrientes e formas de aplicação para minimizar as perdas por lixiviação (Pinheiro et al., 2019), volatilização e emissão de GEE, bem como evitar efeito salino nas plantas, especialmente

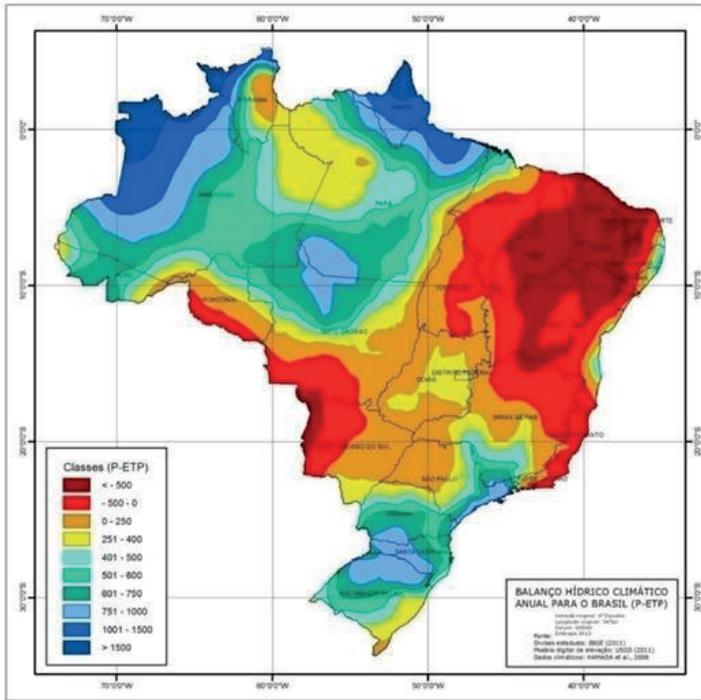


Figura 6. Balanço hídrico anual para eucalipto no Brasil (Wrege et al., 2018).

Fotos: Guilherme de Castro Andrade



Figura 7. Povoamentos de *E. cloeziana* (A) e de *E. benthamii* (B), estabelecidos em região com ocorrência de déficit hídrico (estado do Mato Grosso do Sul) e de geadas (região de Ponta Grossa, PR), respectivamente.

sob uso de fertilizantes com elevada concentração de sais. Neste sentido, o manejo do potássio em plantios florestais sob condições de estresse hídrico tem recebido atenção pelos mecanismos envolvidos no funcionamento fisiológico das plantas, como a regulação da atividade estomática das folhas, controlando as transferências de ar (CO_2 e O_2) e vapor de água (transpiração), repercutindo sobre a fotossíntese, a eficiência do uso da água (Battie-Laclau et al., 2016) e o crescimento das árvores (Melo et al., 2016; Chambi-Legoas et al., 2017). O efeito da precipitação pluvial e nutrição potássica no desenvolvimento de *E. grandis* foi estudado por diversos autores (Almeida et al., 2007, Freitas et al., 2015; Christina et al., 2015, 2018; Battie-Laclau et al., 2016; Epron et al., 2016, Chambi-Legoas et al., 2017). Epron et al. (2016), estudando o efeito da fertilização potássica em um plantio de eucalipto com dois anos de idade, em situação de estresse hídrico no estado de São Paulo, observaram que a velocidade de alocação de carbono no tronco pode dobrar em árvores com suprimento de K em relação àquelas que não receberam a suplementação. Em regiões mais áridas e com maior risco de seca prolongada, todavia, o uso de maiores doses de fertilizante potássico pode aumentar o estresse hídrico das árvores durante a seca (Chambi-Legoas et al., 2017; Christina et al., 2018) sendo, por isso, salutar o uso criterioso da fertilização potássica, ajustado às diferentes condições de solo e de clima em que estão estabelecidos os povoamentos florestais.

Convivência com a geadas

A segunda maior área plantada de eucalipto no País está localizada na região Sul do Brasil, que apresenta plantios com rápido crescimento e alta produtividade principalmente em função das excelentes condições de pluviosidade dessa região. Contudo, muitos materiais genéticos de eucalipto apresentam baixa tolerância à geadas, com vários sinistros relacionados a esse evento climático sendo registrados em áreas comerciais (Ferreira, 2015; Garcia; Santos, 1995, Figura 8). No estado do Rio Grande do Sul, por exemplo, mesmo para plantios a partir de setembro, as mudas no campo ficam sujeitas à ocorrência de geadas tardias de primavera (Wrege et al., 2009). Embora a geadas seja bem mais comum no Sul do Brasil, ocorre também na região Sudeste, em zonas de altitude, como o Sul de Minas Gerais e nas regiões serranas de São Paulo.

Nas regiões que apresentam maior risco de ocorrência de geadas, é fundamental a seleção de materiais genéticos tolerantes/resistentes, conforme a região de produção, sendo salutar, complementarmente, a seleção de áreas para plantio que dificultem o acúmulo de massas de ar frio, devendo-se evitar fundos de vales e encostas voltadas para as faces sul, sudeste e sudoeste, a adoção de estratégias que amenizam os efeitos dos ventos das frentes frias vindos do sul, a realização de ajustes na época de plantio, o manejo das brotações e a adequação da adubação (quantidade e época), quando necessário.

Fotos: Guilherme de Castro Andrade

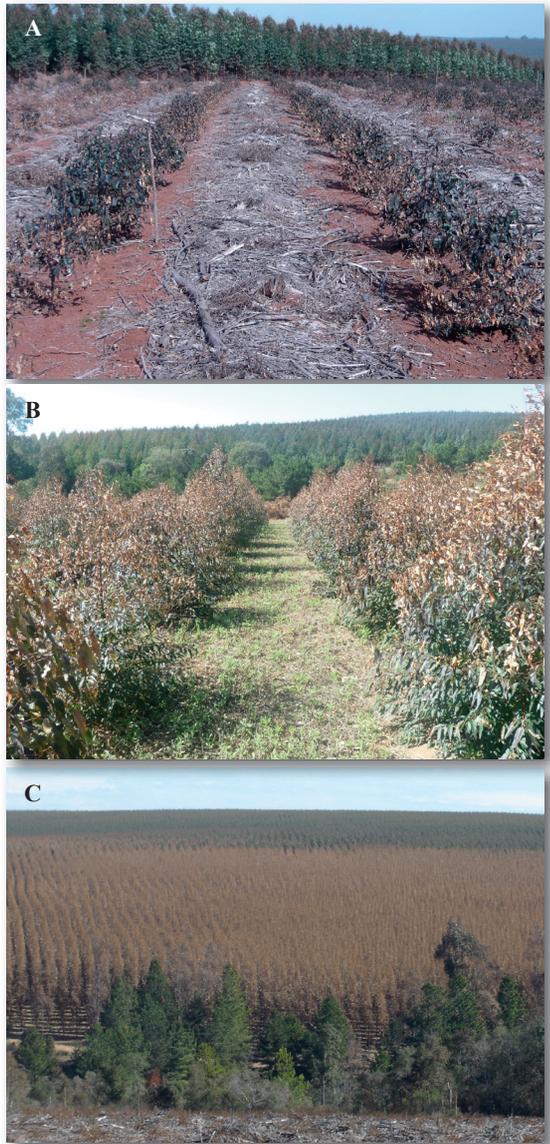


Figura 8. Efeitos da geada ocorrida no ano de 2008, em povoamentos de eucalipto, em diferentes fases de desenvolvimento, estabelecidos no estado de São Paulo.

Estudos sobre a interação entre ocorrência de geada e estado nutricional das plantas no Centro-Sul brasileiro são escassos. Os efeitos negativos da adubação com N e K quanto à sobrevivência e a resistência às geadas de mudas no campo foram observadas por Lisbão Júnior (1980) em três procedências australianas de *E. dunii*, no Paraná. Para diminuir os prejuízos relacionados à geada, os autores sugeriram parcelar ou adiar a adubação em plantios realizados em período próximos à época de ocorrência de geadas.

Embora não seja considerado nutriente essencial às plantas, o fornecimento de silício (Si) é apontado como uma estratégia potencial para aumento da resistência das plantas a intempéries climáticas (Santana et al., 2007) e injúrias provocadas por agentes biológicos (Queiroz et al., 2018), podendo promover o desenvolvimento de folhas mais rígidas devido à sua acumulação na epiderme (Korndörfer et al., 1999) ou, adicionalmente, atuar de forma indireta sobre a fotossíntese e a bioquímica das plantas quando submetidas a algum tipo de estresse (Savant et al., 1999; Abdalla, 2011). No Brasil, resultados obtidos por Carvalho et al. (2003), Santanta et al. (2007) e Queiroz et al. (2018) indicaram, respectivamente, que *E. grandis* e *E. camaldulensis* não são acumuladoras de Si. *E. camaldulensis*, todavia, apresenta capacidade de absorção e translocação desse nutriente (Queiroz et al., 2018). Quanto à função protetora, Santana et al. (2007) apontaram que o uso de Si em *E. grandis*, em condições de campo, pode reduzir os danos provocados pela geada, diferindo dos resultados observados por Da ros et al. (2018) para *Toona ciliata* em consórcio com *E. grandis*, em plantio no campo. Em condições de viveiro, Bognola et al. (2011) recomendaram cautela no uso de silicatos de Ca em substratos preparados para uso em mudas de eucalipto, principalmente quando possuírem uma composição básica equilibrada em termos de nutrientes e pH, pelos riscos relacionados a desequilíbrios na razão entre nutrientes disponíveis às plantas com a adição de Ca no substrato, e o estabelecimento de relações antagônicas entre cátions no processo de absorção pelas raízes.

Considerações finais

Importantes avanços no melhoramento genético e no manejo silvicultural do eucalipto possibilitaram triplicar a produtividade média dos povoamentos florestais estabelecidos no Brasil, nas últimas décadas. Adequações tecnológicas, como a adoção de novos implementos e ferramentas computacionais associadas ao conceito de silvicultura de precisão, bem como a busca por insumos alternativos como fosfatos naturais, resíduos orgânicos industriais e agrícolas, têm favorecido o estabelecimento de práticas e processos silviculturais conservacionistas. As estratégias voltadas à manutenção da resiliência e sustentabilidade dos sistemas produtivos têm possibilitado aos setores consumidores de madeira maior alinhamento às agendas nacionais e internacionais voltadas à integração entre produção e aos princípios do desenvolvimento sustentável, conforme preconizado pelos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) (ONU Brasil, 2019). No presente capítulo foram elencados diversos desafios da silvicultura nacional e que, embora sejam agentes potencializadores de vulnerabilidades ao sistema de produção, podem também ser abordados como oportunidades ao avanço científico e tecnológico do setor, em um contexto social, econômico e ambiental, cada dia mais complexo.

Junto à adoção de novos materiais genéticos adaptados às restrições de clima e solos, é essencial o desenvolvimento de tecnologias voltadas ao uso mais eficiente dos fertilizantes, a adoção de novos insumo e práticas voltadas a minimizar perdas e impactos ambientais, bem como a adaptação de tecnologias pré-existentes em áreas de plantio emergentes, com novos arranjos tecnológicos e sociais, voltados ao atendimento de novos mercados consumidores de matéria-prima.

Na pesquisa, o estabelecimento e a manutenção de redes de ensaios multidisciplinares, o monitoramento de longo prazo de áreas experimentais e o estabelecimento de bases de dados com parâmetros de produção, nutricionais, climáticos e indicadores de transferência de carbono e nutrientes entre compartimentos (solo-planta-atmosfera) possibilitarão o desenvolvimento e o aprimoramento de modelos preditivos de produção e dos impactos dos sistemas florestais no ambiente. Os resultados dessas ações irão também auxiliar o setor na construção e na implantação de um desenvolvimento tecnológico resiliente, voltado a consolidar uma economia de baixa emissão de carbono.

Referências

- ABDALLA, M. M. Beneficial effects of diatomite on growth, the biochemical contents and polymorphic DNA in *Lupinus albus* plants grown under water stress. **Agriculture and Biology Journal of North America**, v. 2, p. 207-220, 2011.
- AL-KAISI, M. M.; DOUELLE, A.; KAW-MENSAH, D. Soil microaggregate and macroaggregate decay over time and soil carbon change as influence by different tillage systems. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 69, n. 6, p. 574-580, 2014. DOI: <https://doi.org/10.2489/jswc.69.6.574>.
- ALMEIDA, C. A.; SOARES, J. V.; LANSBERG, J. J.; REZENDE, G. D. Growth and water balance of *Eucalyptus grandis* hybrid plantations in Brazil during a rotation for pulp production. **Forest Ecology and Management**, v. 251, p. 10–21, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.06.009>.
- ANDRADE, G. C.; BOGNOLA, I. A.; BELLOTE, A. F. J.; FRANCISCON, L.; WATERLOO, M. J.; BRUIJNZEEL, L. A. Site evaluation and productivity of a 3-year old stand of *Eucalyptus urograndis* in São Paulo, Brazil. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 31, p. 331-346, 2011. DOI: <https://doi.org/10.4336/2011.pfb.31.68.331>.
- ANDRADE, G. C.; SILVA, H. D.; FERREIRA, C. A.; BELLOTE, A. F. J.; MORO, L. Contribucion del agua de lluvia en la oferta de nutrientes minerales para el *Eucalyptus grandis*. **Bosque**, v. 16, n. 1, p. 47-51, 1995.
- ATAÍDE, G. M.; CASTRO, R. V. O.; CORREIA, A. C. G.; REIS, G. G.; REIS, M. G. F.; ROSADO, A. M. Interação árvores e ventos: aspectos ecofisiológicos e silviculturais. **Ciência Florestal**, v. 25, n. 2, p. 523-536, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.5902/1980509818472>.
- AUER, C. G.; BETTIOL, W. Efeito da serapilheira de *Eucalyptus grandis* no crescimento micelial de *Pisolithus tinctorius* em meio de cultura. **IPEF**, n. 32, p. 49-52, 1986.

- BACHEGA, L. R.; BOUILLET, J.-P.; PICCOLO, M. C.; SAINT-ANDRÉ, L.; BOUVET, J.-M.; NOUVELLON, Y.; GONÇALVES, J. L. M.; ROBIN, A.; LACLAU, J.-P. Decomposition of *Eucalyptus grandis* and *Acacia mangium* leaves and fine roots in tropical conditions did not meet the Home Field Advantage hypothesis. **Forest Ecology and Management**, v. 359, p.33-43, 2016. p. 33-43, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.09.026>.
- BAESSO, R.; RIBEIRO, A.; SILVA, M. Impacto das mudanças climáticas na produtividade do eucalipto na região norte do Espírito Santo e sul da Bahia. **Ciência Florestal**, v. 20, n. 2, p. 335-344, 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.5902/198050981856>.
- BALIEIRO, F. C.; ALVES, B. J. R.; PEREIRA, M. G.; FARIA, S. M.; FRANCO, A. A.; CAMPELLO, E. F. C. Biological nitrogen fixation and nutrient release from litter of the guachapele leguminous tree under pure and mixed plantation with eucalyptus. **Cerne**, v. 14, p. 185-193, 2008.
- BALIEIRO, F. C.; CESÁRIO, F. V.; SANTOS, F. M.; CHAER, G. M. Litter decomposition and soil carbon stocks in mixed plantations of Eucalyptus and nitrogen fixing trees. In: CARDOSO, E.; GONÇALVES, J. L. M.; BALIEIRO, F. C.; FRANCO, A. A. (ed.). **Mixed plantations of eucalyptus and leguminous trees: soil, microbiology and ecosystem services**. New York: Springer, 2020a.
- BALIEIRO, F. C.; MORAES, L. F. D.; MOURA, C. J. R.; SANTOS, F. M.; PRUDÊNCIO, A. Ecosystem services in planted eucalyptus forest and mixed and multifunctional planted forests. In: CARDOSO, E.; GONÇALVES, J. L. M.; BALIEIRO, F. C.; FRANCO, A. A. (ed.). **Mixed plantations of eucalyptus and leguminous trees: soil, microbiology and ecosystem services**. New York: Springer, 2020b.
- BALIEIRO, F. C.; FRANCO, A. A.; PEREIRA, M. G.; CAMPELLO, E. F. C.; DIAS, L. E.; FARIA, S. M.; ALVES, B. J. R. Dinâmica da serapilheira e transferência de nitrogênio ao solo, em plantios de *Pseudosamanea guachapele* e *Eucalyptus grandis*. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39. p. 597-601, 2004.
- BALIEIRO, F. C.; TONINI, H.; LIMA, R. A. Produção científica brasileira (2007-2016) sobre *Acacia mangium* Willd.: estado da arte e reflexões. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, v. 35, p. 37-52, 2018.
- BATAGLIA, O. C.; QUAGGIO, J. A.; SANTOS, W. R.; ABREU, M. F. Diagnóstico nutricional do cafeeiro pelo DRIS variando se a constante de sensibilidade dos nutrientes de acordo com a intensidade e frequência de resposta na produção. **Bragantia**, v. 63, n. 2, p. 253-263, 2004.
- BATTIE-LACLAU, P.; DELGADO-ROJAS, J. S.; CHRISTINA, M.; NOUVELLON, Y.; BOUILLET, J. P.; DE CASSIA PICCOLO, M.; MOREIRA, M. Z.; GONÇALVES, J. L. G.; ROUPSARD, O.; LACLAU, J. -P. Potassium fertilization increases water-use efficiency for stem biomass production withoaliut affecting intrinsic water-use efficiency in *Eucalyptus grandis* plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 364, p. 77-89, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.01.004>.
- BEAUFILS, E. R. **Diagnosis and Recommendation Integrated Systems (DRIS) a general scheme for experimentation and calibration based on principles from research in plant nutrition**. Pietermaritzburg: University of Natal, South Africa, 1973. 132 p. (Soil science bulletin, I)
- BELLOTE, A. F. J.; DEDECEK, R. A.; SILVA, H. D. Nutrientes minerais, biomassa e deposição de serapilheira em plantio de *Eucalyptus* com diferentes sistemas de manejo de resíduos florestais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, n. 56, p. 31-41, 2008a. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/315460>.

- BELLOTE, A. F. J.; DEDECEK, R. A.; SILVA, H. D.; GAVA, J. L.; MENEGOL, O. Nutrient export by clear cutting *Eucalyptus grandis* of different ages on two sites in Brazil. In: KOBAYASHI, S.; TURNBULL, J. W.; TOMA, T.; MORI, T.; MAJUID, N. M. N. A. (ed.). **Rehabilitation of degraded tropical forest ecosystems**. Jakarta: SMK Grafika Desa Putera, 2001. p. 173-177.
- BELLOTE, A. F. J.; FERREIRA, C. A.; SILVA, H. D. Nutrição, adubação e calagem para *Eucalyptus*. In: FERREIRA, C. A.; SILVA, H. D. da. (ed.). **Formação de povoamentos florestais**. Colombo: Embrapa Florestas, 2008b. p. 55-65. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/302664>.
- BELLOTE, A. F. J.; NEVES, E. J. M. **Calagem e adubação em espécies florestais plantadas na propriedade rural**. Colombo: Embrapa Florestas, 2001. 6 p. (Embrapa Florestas. Circular técnica, 54). Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/306311>.
- BELLOTE, A. F. J.; SARRUGE, J. R.; HAAG, H. P.; OLIVEIRA, G. D. Extração e exportação de nutrientes pelo *Eucalyptus grandis* Hill ex-Maiden em função da idade: 1. Macronutrientes. **IPEF**, v. 20, p. 1-23, 1980.
- BELLOTE, A. F. J.; SILVA, H. D. Técnicas de amostragem e avaliações nutricionais em plantios de *Eucalyptus* spp. In: GONÇALVES, J. L. M., BENEDETTI, V. (org.). **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba: IPEF, 2000. p. 105-133.
- BENDER, S. F.; CONEN, F.; Van der HEIJIDEN, M. G. A. Mycorrhizal effects on nutrient cycling, nutrient leaching and N₂O production in experimental grassland. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 80, p. 283-292, 2015.
- BERNHARD-REVERSAT, F. Nitrogen cycling in tree plantations grown on a poor sandy savanna soil in Congo. **Applied Soil Ecology**, v. 4, p. 161-172, 1996.
- BERTOLLA, A. **Eucalipto-100 anos de Brasil- “Falem mal, mas continuem falando de mim!”**. [S.l.: s.n.], 2013. 89 p. Disponível em: http://www.celso-foelkel.com.br/artigos/outros/Eucalipto_100%20anos%20de%20Brasil_Alexandre_Bertola.pdf. Acesso em: 16 ago. 2019
- BEVERLY, R. B. Prescient diagnostic analysis shows sufficiency range approach superior to DRIS for Citrus. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 23, p. 15-18, 1991.
- BINI, D.; SANTOS, C. A.; BOUILLET, J.-P.; GONÇALVES, J. L. M.; CARDOSO, E. J. B. N. *Eucalyptus grandis* and *Acacia mangium* in monoculture and intercropped plantations: evolution of soil and litter microbial and chemical attributes during early stages of plant development. **Applied Soil Ecology**, v. 63, p. 57-66, 2013.
- BINI, D.; SANTOS, C. A.; SILVA, M. C. P.; BONFIM, J. A.; CARDOSO, E. J. B. N. Intercropping *Acacia mangium* stimulates AMF colonization and soil phosphatase activity in *Eucalyptus grandis*. **Scientia Agricola**, v. 75, n. 2, p. 102-110, 2018. DOI: <https://dx.doi.org/10.1590/1678-992x-2016-0337>.
- BINKLEY, D.; DUNKIN, K. A.; DEBELL, D. S.; RYAN, M. G. Production and nutrient cycling in mixed plantations of *Eucalyptus* and *Albizia* in Hawaii. **Forest Science**, v. 38, n. 2, p. 393-408, 1992.
- BOGNOLA, I. A.; CLASEN, L. A.; FRANCISCON, L.; GAVA, J. L.; DEDECEK, R. A.; SILVA, F. M. Aplicação de silicatos de cálcio e de potássio e o crescimento de mudas de *Eucalyptus grandis*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 31, n. 66, p. 83-92, 2011. DOI: <https://doi.org/10.4336/2011.pfb.31.66.83>.
- BOOTH, T. H. Eucalypt plantations and climate change. **Forest Ecology and Management**, v. 301, p. 28-34, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.04.004>.

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, F.; LEVILLAIN, J.; DELEPORTE, P.; EPRON, D.; NOUVELLON, Y. *Eucalyptus* and *Acacia* tree growth over entire rotation in single- and mixed-species plantations across five sites in Brazil and Congo. **Forest Ecology and Management**, v. 301, p. 89-101, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.09.019>.

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, S. M.; GALIANA, A. Mixed-species plantations of *Acacia mangium* and *Eucalyptus grandis* in Brazil: 2: nitrogen accumulation in the stands and biological N₂ fixation. **Forest Ecology and Management**, v. 255, n.12, p. 3918-3930, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.10.050>.

BRAZ, R. L.; DA SILVA OLIVEIRA, J. T.; ROSADO, A. M.; VIDAURRE, G. B.; PAES, J. B.; TOMAZELLO FILHO, M.; LOIOLA, P. L. Caracterização anatômica, física e química da madeira de clones de *Eucalyptus* cultivados em áreas sujeitas à ação de ventos. **Revista Ciência da Madeira**, v. 5, n. 2, p. 127-137, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.15210/cmadv5i2.4790>.

BROCKWELL, J.; SEARLE, S. D.; JEAUVONS, A. L.; WAAYERS, M. Nitrogen fixation in Acacias: an untapped resource for sustainable plantations, farm, forestry and land reclamation. **ACIAR Monograph**, n. 115, 2005, 132 p.

CARMO, D. N.; RESENDE, M.; SILVA, T. C. A. Avaliação da aptidão das terras para eucalipto. In: BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F. (org.). **Relação solo-eucalipto**. Viçosa, MG: Folha de Viçosa, 1990. p. 187-235.

CARVALHO, M. P.; AMAZONAS, M. A. L. A. Diversidade e distribuição sazonal da produtividade de corpos frutíferos de fungos ectomicorrízicos associados a plantações de *Pinus* spp. e *Eucalyptus* spp. da Embrapa Florestas. In: EVENTO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA EMBRAPA FLORESTAS, 1., 2002, Colombo. **Anais...** Colombo: Embrapa Florestas, 2002.

CARVALHO, R.; FURTINI NETO, A. E.; CURTI, N.; RESENDE, Á. V. Absorção e translocação de silício em mudas de eucalipto cultivadas em latossolo e cambissolo. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 27, n. 3, p. 491-500, 2003. DOI: <https://dx.doi.org/10.1590/S1413-70542003000300001>.

CAVICHIOLO, S. R.; DEDECEK, R. A.; GAVA, J. L. Preparo do solo e o estado nutricional da rebrota de *Eucalyptus saligna*. **Scientia Forestalis**, v. 66, p. 120-127, 2004. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/292185/1/preparodosoloeestadonutricionaldarebrota.pdf>.

CAVICHIOLO, S. R.; DEDECEK, R. A.; GAVA, J. L. Avaliação do efeito do sistema de preparo em solos de diferentes texturas, na sua resistência mecânica e na produtividade da rebrota de *Eucalyptus saligna*. **Boletim de Pesquisa Florestal**, n. 47, p. 83-98, 2003. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/302236/1/pag8398.pdf>.

CHAER, G. M.; TÓTOLA, M. R. Impacto do manejo de resíduos orgânicos durante a reforma de plantios de eucalipto sobre indicadores de qualidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 6, p. 1381-1396, 2007.

CHAMBI-LEGOAS, R.; CHAIX, G.; TOMAZELLO FILHO, M. *Eucalyptus grandis* trees growth: effects of nutrition and water availability and interactions with the environment in a prolonged drought period. In: ANIVERSARY CONGRESS, 125. **Abstracts** [...]. Freiburg: Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt (FVA), p. 350, 2017.

CHAPIN III, F. S. The mineral nutrition of wild plants. **Annual Review of Ecology and Systematics**, v. 11, n. 1, p. 233-260, 1980.

CHRISTINA, M.; LE MAIRE, G.; BATTIE-LACLAU, P.; NOUVELLON, Y.; BOUILLET, J. P.; JOURDAN, C.; GONÇALVES, J. L. M.; LACLAU, J.-P. Measured and modeled interactive effects of potassium deficiency and water deficit on gross primary productivity and light-use efficiency in *Eucalyptus grandis* plantations. **Global Change Biology**, v. 21, n. 5, p. 2022–2039, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.12817>.

CHRISTINA, M.; LE MAIRE, G.; NOUVELLON, Y.; VEZY, R.; BORDON, B.; BATTIE-LACLAU, P.; GONCALVES, J. L. M.; DELGADO-ROJAS, J. S.; BOUILLET, J.-P.; LACLAU, J.-P. Simulating the effects of different potassium and water supply regimes on soil water content and water table depth over a rotation of a tropical *Eucalyptus grandis* plantation. **Forest Ecology and Management**, v. 148, p. 4–14, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.12.048>.

COOK, R.; BINKLEY, D.; STAPE, J. L. *Eucalyptus* plantation effects on soil carbon after 20years and three rotations in Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 359, p. 92-98, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.09.035>.

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 harvest residue and nitrogen management practices: a modelling analysis. **Forest Ecology and Management**, v. 217, p.1-18, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.05.057>.

DAI, J.; HU, J.; ZHU, A.; BAI, J.; WANG, J.; LIN, X. No tillage enhances arbuscular mycorrhizal fungal population, glomalin-related soil protein content, and organic carbon accumulation in soil macroaggregates. **Journal of Soils and Sediments**, v. 15, n. 5, p. 1055-1062, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11368-015-1091-9>.

DA ROS, C. O.; PERRANDO, E. R.; PAULA, G. M.; SOMAVILLA, L.; PREDIGE, D. M. A. P.; ENGEL, K. SILVA, R. F. da. Resistência à geadas e crescimento inicial de *Toona ciliata* em cultivos consorciados com *Eucalyptus grandis* em diferentes adubações. **Ciência Florestal**, v. 28, n. 2, p. 796-796, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.5902/1980509832092>.

DEDECEK, R. A.; BELLOTE, A. F. J.; MENEGOL, O. Influence of residue management and soil tillage on second rotation *Eucalyptus* growth. **Scientia Forestalis**, v. 74, p. 9-17, 2007. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/312307/1/Influenceofresiduemangementandsoil.pdf>.

EISSENSTAT, D. M.; WELLS, C. E.; YANAI, R. D.; WHITBECK, J. L. Building roots in a changing environment: implications for root longevity. **The New Phytologist**, v. 147, n. 1, p. 33-42, 2000.

ELWALI, A. M. O.; GASCHO, J. G. Soil testing, foliar analysis, and DRIS as guide for sugarcane fertilization. **Agronomy Journal**, v. 76, p. 466-470, 1984.

EPRON, D.; CABRAL, O. M. R.; LACLAU, J. P.; DANNOURA, M.; PACKER, A. P.; PLAIN, C.; BATTIE-LACLAU, P.; MOREIRA, M. Z.; TRIVELIN, P. C. O.; BOUILLET, J. P.; GÉRANT, D.; NOUVELLON, Y. In situ CO pulse labelling of field-grown eucalypt trees revealed the effects of potassium nutrition and throughfall exclusion on phloem transport of photosynthetic carbon. **Tree Physiology**, v. 36, p. 6-21, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1093/treephys/tpv090>.

EPRON, D.; NOUVELLON, Y.; MARESCHAL, L.; MOREIRA, R. M. e; KOUTIKA, L.-S.; GENESTE, B.; DELGADO-ROJAS, J. S.; LACLAU, J.-P.; SOLA, G.; GONÇALVES, J. L. M.; BOUILLET, J.-P. Partitioning of net primary production in *Eucalyptus* and *Acacia* stands and in mixed-species plantations: two case-studies in contrasting tropical environments. **Forest Ecology and Management**, v. 301, p. 102-111, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.10.034>.

FARIA, A. B. C.; MONTEIRO, P. H. R.; AUER, C. A.; ÂNGELO, A. C. Uso de ectomicorizas na biorremediação florestal. **Ciência Florestal**, v. 27, n. 1, p. 21-29, 2017. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509826444>.

FARIA, G. E. de; BARROS, N. F. de; CUNHA, V. L. P.; MARTINS, I. S.; MARTINS, R. D. C. C. Avaliação da produtividade, conteúdo e eficiência de utilização de nutrientes em genótipos de *Eucalyptus* spp. no vale do Jequitinhonha, MG. **Ciência Florestal**, v. 18, n. 3, p. 363-373, 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.5902/19805098448>.

FARIA, S. M.; BALIEIRO, F. C.; PAULA, R. R.; SANTOS, F. M.; ZILLI, J. E. Biological Nitrogen Fixation (BNF) in Mixed Forest Plantations. In: CARDOSO, E.; GONÇALVES, J. L. M.; BALIEIRO, F. C.; FRANCO, A. A. (ed.). **Mixed plantations of eucalyptus and leguminous trees: soil, microbiology and ecosystem services**. New York: Springer, 2020.

FERREIRA, C. A. Nutrição mineral de florestas plantadas: o estado atual e as tendências da pesquisa e da prática. In: CONGRESSO FLORESTAL PANAMERICANO, 1.; CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 7., 1993, Curitiba. **Floresta para o desenvolvimento: política, ambiente, tecnologia e mercado: anais**. São Paulo: SBS; [SI]: SBEF, 1993. v. 3, p. 157-162. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/299575/1/CFPNutricaoMineral1.pdf>.

FERREIRA, M. A aventura dos Eucaliptos. In: SCHUMACHER, M. V.; VIERA, M. (ed.). **Silvicultura do eucalipto no Brasil**. Santa Maria, RS: Ed da UFSM, 2015. p. 13-48.

FIALHO, R.; ZINN, Y. L. Changes in soil carbon under *Eucalyptus* plantations in Brazil: a comparative analysis. **Land Degradation and Development**, v. 25, n. 5, p. 428-437, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1002/ldr.2158>.

FORRESTER, D. I.; PARES, A.; HARA, C. O.; KHANNA, P. K.; BAUHUS, J. Soil organic carbon is increased in mixed-species plantations of *Eucalyptus* and nitrogen-fixing *Acacia*. **Ecosystems**, v. 16, p. 123-132, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10021-012-9600-9>.

FORRESTER, D. I.; BAUHUS, J.; COWIE, A. L. Nutrient cycling in a mixed species plantation of *Eucalyptus globulus* and *Acacia mearnsii*. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 35, p. 2942-2950, 2005.

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**, v. 233, n. 2-3, p. 211-230, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.05.012>.

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: [s.n.], 1995. p. 459-467.

- FREITAS, P. de C. e.; SETTE JUNIOR, C. R.; CASTRO, V. R.; CHAIX, G.; LACLAU, J. P.; TOMAZELLO FILHO, M. Efeito da disponibilidade hídrica e da aplicação de potássio e sódio nas características anatômicas do lenho juvenil de *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, v. 39, n. 2, p. 405-416, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0100-67622015000200020>.
- FROSI, G.; BARROS, V. A.; SANTOS, M.; RAMOS, D. G.; MAIA, L. C.; SANTOS, M. G. Symbiosis with AMF and leaf Pi supply increases water deficit tolerance of woody species from seasonal dry tropical forest. **Journal of Plant Physiology**, v. 207, p. 84-93, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2016.11.002>.
- GANGE, A. C.; GANE, D. R.; CHEN, Y.; GONG, M. Dual colonization of *Eucalyptus urophylla* ST Blake by arbuscular and ectomycorrhizal fungi affects levels of insect herbivore attack. **Agricultural and Forest Entomology**, v. 7, n. 3, p. 253-263, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1461-9555.2005.00268.x>.
- GARAY, I.; KINDEL, A.; CARNEIRO, R.; FRANCO, A. A.; BARROS, E.; ABBADIE, L. Comparação da matéria orgânica e de outros atributos do solo em plantações de *Acacia mangium* e *Eucalyptus grandis*. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 4, p. 705-712, 2003.
- GARCIA, C. H.; SANTOS, P. E. T. Danos ocasionados pelas geadas no estado de São Paulo. **Florestar Estatístico**, v. 2, p. 23-24, 1995.
- GARTNER, T. B.; CARDON, Z. Decomposition dynamics in mixed-species leaf litter. **Oikos**, v. 104, n. 2, p. 230-246, 2004.
- GONÇALVES, J. L. M. Conservação do solo. In: GONÇALVES, J. L. M.; STAPE, J. L. **Conservação e cultivo de solos para plantações florestais**. Piracicaba: IPEF, 2002. p. 47-129.
- GONÇALVES, J. L. M. Eucalipto. In: PROCHNOW, L. I.; CASARIN, L. I.; STIPP, S. R. **Boas práticas para uso de fertilizantes**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2014. p. 309-369. Volume 3: Culturas.
- GONÇALVES, J. L. M.; STAPE, J. L.; BENEDETTI, V. Reflexos do cultivo mínimo e intensivo do solo em sua fertilidade e nutrição das árvores. In: GONÇALVES, J. L. M., BENEDETTI, V. (ed.). **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba: IPEF, 2000. p. 1-57.
- GONÇALVES, J. L. M.; ALVARES, C. A.; HIGA, A. R.; SILVA, L. D.; ALFENAS, A. C.; STAHL, J.; FERRAZ, S. F. B.; LIMA, W. P.; BRANCALION, P. H. S.; HUBNER, A.; BOUILLET, J.-P. D.; LACLAU, J.-P.; NOUVELLON, Y.; EPRON, D. Integrating genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 301, p. 6-27, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.12.030>.
- GONÇALVES, J. L. M.; ALVARES, C. A.; ROCHA, J. H. T.; BRANDANI, C. B.; HAKAMADA, R. Eucalypt plantation management in regions with water stress. **Southern Forests**, v. 1, p. 1-15, 2017. DOI: <https://doi.org/10.2989/20702620.2016.1255415>.
- GPTNFF. Grupo Permanente de Trabalho em Nutrição e Fertilização Florestal. **Pesquisa em nutrição e fertilização florestal: diagnóstico e prioridades**. Curitiba: Embrapa-Unidade Regional de Pesquisa Florestal Centro-Sul, 1983. 12 p. (EMBRAPA-URPFCS. Documentos, 13). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/291032/1/doc13.pdf>.
- GUINDANI, R. H. P.; ANGHINONI, I.; NACHTIGALL, G. R. DRIS na avaliação do estado nutricional do arroz irrigado por inundação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 109-118, 2009. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832009000100012>.

HARRIS-VALLE, C.; ESQUEDA, M.; VALENZUELA-SOTO, E. M.; CASTELLANOS, A. E. Tolerancia al estrés hídrico en la interacción planta-hongo micorrízico arbuscular: metabolismo energético y fisiología. **Revista Fitotecnia Mexicana**, v. 32, n. 4, p. 265-271, 2009.

IBÁ. Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório 2017 = Report 2017**. Brasília, DF, 2017. 77 p. Disponível em: https://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2017.pdf. Acesso em: 27 jun. 2019.

JONES, C. A. Proposed modifications of the diagnosis and recommendation integrated system (DRIS) for interpreting plant analyses. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 12, n. 8, p. 785-794, 1981. DOI: <https://doi.org/10.1080/00103628109367194>.

KAYE, J. P.; RESH, S. C.; KAYE, M. W.; CHIMNER, R. A. Nutrient and carbon dynamics in a replacement series of *Eucalyptus* and *Albizia* trees. **Ecology**, v. 81, n. 12, p. 3267-3273, 2000. DOI: [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(2000\)081\[3267:NACDIA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(2000)081[3267:NACDIA]2.0.CO;2).

KOHLER, J.; ROLDÁN, A.; CAMPOY, M.; CARAVACA, F. Unraveling the role of hyphal networks from arbuscular mycorrhizal fungi in aggregate stabilization of semiarid soils with different textures and carbonate contents. **Plant and Soil**, v. 410, n. 1-2, p. 273-281, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-016-3001-3>.

KORNDÖRFER, G. H.; ARANTES, V. A.; CORRÊA, G. F.; SNYDER, G. H. Efeito do silicato de cálcio no teor de silício e na produção de grãos de arroz de sequeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 635-629, 1999. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06831999000300017>.

KOUTIKA, L.-S.; EPRON, D.; BOUILLET, J.-P.; MARESCHAL, L. Changes in N and C concentrations, soil acidity and P availability in tropical mixed acacia and eucalypt plantations on a nutrient-poor sandy soil. **Plant and Soil**, v. 379, p. 205-216, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2047-3>.

KOUTIKA, L.-S.; MARESCHAL, L. Acacia and eucalypt change P, N and C concentrations in POM of Arenosols in the Congolese coastal plains. **Geoderma Regional**, v. 11, p. 37-43, 2017.

KURIHARA, C. H.; STAUT, L. A.; MAEDA, S.; SANTOS, F. C. **Diagnose do estado nutricional de soja e algodoeiro, pelos métodos das faixas de suficiência e DRIS, em Mato Grosso do Sul e Mato Grosso**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2014. (Embrapa Agropecuária Oeste. Circular técnica, 29).

KURIHARA, C. H. **Demanda de nutrientes pela soja e diagnose de seu estado nutricional**. 2004. 101 f. Tese (*Doctor Scientiae*) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

LACLAU, J.-P.; GONÇALVES, J. L. M.; STAPE, J. L. Perspectives for the management of eucalypt plantations under biotic and abiotic stresses. **Forest Ecology and Management**, v. 301, p. 1-5, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.03.007>.

LACLAU, J.-P.; RANGER, J.; GONÇALVES, J. L. M.; MAQUÈRE, V.; KRUSCHE, A. V.; THONGOM'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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.06.010>.

- LANTMANN, A. F.; CASTRO, C.; PEREIRA, J. E. Sistema integrado de diagnose e recomendação (DRIS) para a cultura do girassol (04.2001.339-02). In: HOFFMANN-CAMPO, C. B.; SARAIVA, O. F. (org.). **Resultados de pesquisa da Embrapa Soja - 2002**: girassol e trigo. Londrina: Embrapa Soja, 2003. p. 39-44. (Embrapa Soja. Documentos, 218).
- LIMA, A. M. N.; SILVA, I. R.; NEVES, J. C. L.; NOVAIS, R. F.; BARROS, N. F.; MENDONÇA, E. S.; SMYTH, T. J.; MOREIRA, M. S.; LEITE, F. P. Soil organic carbon dynamics following afforestation of degraded pastures with eucalyptus in southeastern Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 235, n. 1-3, p. 219-231, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.08.331>.
- LIMA, P. L.; ZAKIA, M. J. B. **As florestas plantadas e a água**: implementando o conceito da microbacia hidrográfica como unidade de planejamento. São Carlos: RIMA. 2006. 218 p.
- LISBÃO JUNIOR, L. O efeito da geada e o comportamento inicial de três procedências de *Eucalyptus dunnii* Maiden, em ensaio conjugado de mini-espacamentos e adubação. **Boletim de Pesquisa Florestal**, n. 1, p. 28-49, 1980.
- MAEDA, S. **Interpretação do estado nutricional de soja pelo DRIS no Mato Grosso do Sul**. 2002. 107 f. Tese (Doutorado em Ciências) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- MAEDA, S.; BOGNOLA, I. A.; KURIHARA, C. H.; FRANCISCON, L.; OLIVEIRA, E. B. Obtenção de valores de referência do DRIS para *Pinus taeda*. In: INAMASU, R. Y.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; BERNARDI, A. C. (ed.). **Agricultura de precisão**: um novo olhar. São Carlos: Embrapa Instrumentação, 2011. p. 232-234.
- MARSCHNER, H.; DELL, B. Nutrient uptake in mycorrhizal symbiosis. **Plant and Soil**, v. 159, n. 1, p. 89-102, 1994.
- MARRON, N.; EPRON, D. Are mixed-tree plantations including a nitrogen-fixing species more productive than monocultures? **Forest Ecology and Management**, v. 441, p. 242-252, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.03.052>.
- MELLO, A. H. de; ANTONIOLLI, Z. I.; KAMINSKI, J.; SOUZA, E. L.; OLIVEIRA, V. L. Fungos arbusculares e ectomicorrízicos em áreas de eucalipto e de campo nativo em solo arenoso. **Ciência Florestal**, v. 16, n. 3, 293-301, 2006. DOI: <https://doi.org/10.5902/198050981909>.
- MELLO, A. H. de; ANTONIOLLI, Z. I.; KAMINSKI, J.; SOUZA, E. L.; SCHIRMER, G. K.; MACHADO, R. G.; LUPATINI, M.; MORO JUNIO, C. Estabelecimento a campo de mudas de *Eucalyptus grandis* micorrizadas com *Pisolithus microcarpus* (UFSC Pt 116) em solo arenoso. **Ciência Florestal**, v. 19, n. 2, p. 149-155, 2009. DOI: <http://dx.doi.org/10.5902/19805098406>.
- MELO, E. A. S. C.; GONÇALVES, J. L. M.; ROCHA, J. H. T.; HAKAMADA, R. E.; BAZANI, J. H.; WENZEL, A. V. A.; ARTHUR JUNIOR, J. C.; BORGES, J. S.; MALHEIROS, R.; LEMOS, C. C. Z.; FERREIRA, E. V. O.; FERRAZ, A. V. Responses of clonal Eucalypt plantations to N, P and K fertilizer application in different edaphoclimatic conditions. **Forests**, p. 1-15, 2016. DOI: <https://doi.org/10.3390/f7010002>.
- MESQUITA, M. A. M.; SILVEIRA, P. M.; LEANDRO, W. M.; FLORES, R. A.; MARANHÃO, D. D. C. DRIS standards for nutritional evaluation of *Phaseolus vulgaris* in Cerrado, Goiás State, Brazil. **Australian Journal of Crop Science**, v. 12, n. 2, p. 274-280, 2018.
- MITCHELL, S. J. Wind as a natural disturbance agent in forests: a synthesis. **Forestry**, v. 86, p. 147-157, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1093/forestry/cps058>.

MOLICA, S. G. **Produção de biomassa e eficiência nutricional de híbridos interespecíficos de eucalipto, em duas regiões bioclimáticas de Minas Gerais**. 1992. 84 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

MORAIS, E. D.; BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F.; BRANDI, R. M. Biomassa e eficiência nutricional de espécies de eucalipto em duas regiões bioclimáticas de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 14, n. 3, p. 353-362, 1990.

MOREIRA, F. M. S.; MOREIRA, J. O. S. Fixação biológica de nitrogênio atmosférico. In: MOREIRA, F. M. S.; MOREIRA, J. O. S. (ed.). **Microbiologia e bioquímica do solo**. 2. ed. Lavras: Ed da UFLA, 2006. p. 449-542.

NACHTIGALL, G. R.; DECHEN, A. R. DRIS norms for evaluating the nutritional state of apple tree. **Scientia Agricola**, v. 64, n. 3, p. 282-287, 2007.

NOUVELLON, Y.; LACLAU, J.-P.; EPON, D.; LE MAIRE, G.; BONNEFOND, J.-M.; GONÇALVES, J. L. M.; BOUILLET, J.-P. Production and carbon allocation in monocultures and mixed-species plantations of *Eucalyptus grandis* and *Acacia mangium* in Brazil. **Tree Physiology**, v. 32, p. 680-695, 2012.

NOVAIS, R. F.; BARROS, N. F. Sustainable agriculture and forestry production systems on acid soils: Phosphorus as a case-study. In: MONIZ, A. C.; FURLANI, A. M. C.; SCHAFFERT, R. E.; FAGERIA, N. K.; ROSOLEM, C. A.; CANTARELLA, H. **Plant-soil interactions as low pH: sustainable agriculture and forestry production**. Viçosa, MG, Brazilian Soil Science Society, 1997. p. 39-51.

NOVOTNY, E. H.; RODRIGUES, A. F.; BALIEIRO, F. C.; FREITAS, T. B.; CHAER, G. M.; RACHID, C. T. C. Avaliação das alterações estruturais da serapilheira de florestas plantadas em decomposição por meio da espectroscopia vibracional (FTIR) aliada à análise de componentes principais (PCA). In: ENCONTRO BRASILEIRO DE SUBSTÂNCIAS HÚMICAS, 10., 2013. **Anais [...]**. Santo Antônio de Goiás: Sociedade Internacional de Substâncias Húmicas, 2013. p. 48-51.

OLIVEIRA, J. R. **Crescimento, produção e eficiência nutricional de genótipos de eucalipto em diferentes condições edafoclimáticas de Minas Gerais**. 2017. 150 f. Tese (*Doctor Scientiae*) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

ONU BRASIL. Organização das Nações Unidas Brasil. **Transformando nosso mundo: a agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável**. Disponível em: <https://nacoesunidas.org/wp-content/uploads/2015/10/agenda2030-pt-br.pdf>. Acesso em: 7 ago. 2019.

PAGANO, M. C.; SCOTTI, M. R. Arbuscular and ectomycorrhizal colonization of two *Eucalyptus* species in semiarid Brazil. **Mycoscience**, v. 49, n. 6, p. 379-384, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1007/S10267-008-0435-3>

PAGANO, M. C.; BELLOTE, A. F.; SCOTTI, M. R. Aboveground nutrient components of *Eucalyptus camaldulensis* and *E. grandis* in semiarid Brazil under the nature and the mycorrhizal inoculation conditions. **Journal of Forestry Research**, v. 20, n. 15-22, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11676-009-0003-5>

PALUDZYSZYN FILHO, E.; SANTOS, P. E. T. dos; FERREIRA, C. A. **Eucaliptos indicados para plantio no Estado do Paraná**. Colombo: Embrapa Florestas, 2006. (Embrapa Florestas. Documentos). Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/304430>.

PALUDZYSZYN FILHO, E.; SANTOS, P. E. T. dos. **Escolha de cultivares de eucaliptos em função do ambiente e do uso**. Colombo: Embrapa Florestas, 2013. 11 p. (Embrapa Florestas. Comunicado técnico, 316). Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/977455>.

PARROTTA, J. A. Productivity, nutrient cycling, and succession in single- and mixed-species plantations of *Casuarina equisetifolia*, *Eucalyptus robusta*, and *Leucaena leucocephala* in Puerto Rico. **Forest Ecology and Management**, v. 124, n. 1, p. 45-77, 1999. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(99\)00049-3](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(99)00049-3).

PATERSON, E.; SIM, A.; DAVIDSON, J.; DANIELL, T. J. Arbuscular mycorrhizal hyphae promote priming of native soil organic matter mineralisation. **Plant and Soil**, v. 408, n. 1-2, p. 243-254, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-016-2928-8>.

PAULA, R. R.; BOUILLET, J.-P.; ÇONÇALVES, J. L. M.; TRIVELIN, P. C. O.; BALIEIRO, F. C.; NOUVELLON, Y.; OLIVEIRA, J. C.; DEUS JÚNIOR, J. C.; BORDRON, B.; LACLAU, J.-P. Nitrogen fixation rate of *Acacia mangium* Wild at mid rotation in Brazil is higher in mixed plantations with *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden than in monocultures. **Annals of Forest Science**, v. 75, p. 1-14, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13595-018-0695-9>.

PAULETTI, V.; MOTTA, A. C. V. **Manual de adubação e calagem para o estado do Paraná**. Curitiba: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo/Núcleo Estadual Paraná, 2017.

PEREZ-GARCIA, J.; JOYCE, L. A.; MCGUIRE, D.; XIAO, X. Impacts of climate change on the global forest sector. **Climatic Change**, v. 54, n. 4, p. 439-461, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1016124517309>.

PINHEIRO, R. C.; BOUILLET, J.-P.; BORDRON, B.; ALÓ, L. L.; COSTA, V. E.; ALVARES, C. A.; LACLAU, J.-P. Distance from the trunk and depth of uptake of labelled nitrate for dominant and suppressed trees in Brazilian Eucalyptus plantations: consequences for fertilization practices. **Forest Ecology and Management**, v. 447, p. 95-104, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.05.011>.

PINTO, S. I. do C.; FURTINI NETO, A. E.; NEVES, J. C. L.; FAQUIN, V.; MORETTI, B. D. S. Eficiência nutricional de clones de eucalipto na fase de mudas cultivados em solução nutritiva. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 2, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000200021>.

POGGIANI, F.; ZEN, S.; MENDES, F. S.; SPINA-FRANÇA, F. Ciclagem e exportação de nutrientes em florestas para fins energéticos. **IPEF**, v. 27, p. 17-30, 1984.

POGGIANI, F.; COUTO, H. D.; CORRADINI, L.; FAZZIO, E. C. M. Exportação de biomassa e nutrientes através da exploração dos troncos e das copas de um povoamento de *Eucalyptus saligna*. **Revista IPEF**, v. 25, p. 37-39, 1983.

POZZA, A. A. A.; CARVALHO, J. G. D.; GUIMARES, P. T. G.; FIGUEIREDO, F. C.; ARAÚJO, A. R. Effect of calcium silicate supply and the nutritional efficiency of coffee cultivars. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 6, p. 1705-1714, 2009. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832009000600019>.

PREZOTTI, L. C.; GOMES, J. A.; DADALTO, G. G.; OLIVEIRA, J. A. **Manual de recomendação de calagem e adubação para o estado do Espírito Santo: 5ª aproximação**. Vitória: SEEA/TNCAPER/CEDAGRO, 2007. 305 p.

- QIN, H.; CHEN, J.; WU, Q.; NIU, L.; LI, Y.; LIANG, C.; SHEN, Y.; XU, Q. Intensive management decreases soil aggregation and changes the abundance and community compositions of arbuscular mycorrhizal fungi in Moso bamboo (*Phyllostachys pubescens*) forests. **Forest Ecology and Management**, v. 400, p. 246-255, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.06.003>.
- QUEIROZ, D. L.; CAMARGO, J. M. M.; DEDECEK, R. A.; OLIVEIRA, E. B. de; ZANOL, K. M. R.; MELIDO, R. Absorção e translocação de silício em mudas de *Eucalyptus camaldulensis*. **Ciência Florestal**, v. 28, n. 1, p. 632-640, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.5902/1980509832053>.
- RACHID, C. T. C. C.; BALIEIRO, F. C.; FONSECA, E. S.; PEIXOTO, R. S.; CHAER, G. M.; TIEDJE, J. M.; ROSADO, A. S. Intercropped silviculture systems, a key to achieving soil fungal community management in Eucalyptus plantations. **PLoS One**, v. 10, n. 2, p. e0118515, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0118515>.
- RAIJ, B.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; HIROCE, R.; FURLANI, M. C. (ed.). **Recomendação de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: Instituto Agrônomo, 1996. 285 p. (IAC. Boletim técnico, 100).
- RAVEN, J. A.; FRANCO, A. A.; JESUS, E. L. de; JACOB-NETO J. H⁺ extrusion and organic-acid synthesis in N₂-fixing symbioses involving vascular plants. **New Phytologist**, v. 114, p.369–389, 1990.
- RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V. H. V. (ed). **Recomendações para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª Aproximação**. Viçosa, MG: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. 359 p.
- ROBIN, A.; PRADIER, C.; SANGUIN, H.; MAHE, F.; LAMBAIS, G. R; DE ARAUJO PEREIRA, A. P; GERMON, A.; CINTRA, M.; TISSEYRE, P.; PABLO, A. L.; HEUILLARD, P.; SAUDAVET, M.; BOUILLET, J. P.; ANDROTE, F. D.; PLASSARD, C.; CARDOSO, E. J. B.; LACLAU, J. P.; HINSINGER, P.; JOURDAN, C. How deep can ectomycorrhizae go? A case study down to 4 meter depth in a Brazilian Eucalyptus plantation under rainfall reduction. In: **EUCALYPTUS 2018: Managing Eucalyptus plantation under global changes: abstracts book**. Montpellier: CIRAD, 2018. p. 38-39.
- SANTANA, D. L. Q. THOMAZ, D. T.; RADOMSKI, M. I.; DEDECEK, R. A.; LINHAR, C. A.; CAMARGO, J. M. M. Efeito da aplicação de silício na melhoria da tolerância do *Eucalyptus grandis* à ação da geada e ataque de insetos. In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE SILÍCIO NA AGRICULTURA**, 4., 2007, Botucatu. **Anais [...]**. Botucatu: UNESP, 2007. p. 123-126. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/303398>.
- SANTANA, R. C.; BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F.; LEITE, H. G.; COMERFORD, N. B. Alocação de nutrientes em plantios de eucalipto no Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 2723–2733, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000700016>.
- SANTANDER, C.; AROCA, R.; RUIZ-LOZANO, J. M.; OLAVE, J.; CARTES, P.; BORIE, F.; CORNEJO, P. Arbuscular mycorrhiza effects on plant performance under osmotic stress. **Mycorrhiza**, p. 1-19, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00572-017-0784-x>.
- SANTOS, F. M.; BALIEIRO, F. C.; ATAÍDE, D. H. S.; DINIZ, A. R.; CHAER, G. M. Dynamics of aboveground biomass accumulation in monospecific and mixed-species plantations of *Eucalyptus* and *Acacia* on a Brazilian sandy soil. **Forest Ecology and Management**, v. 363, p. 86–97, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.12.028>.

SANTOS, F. M.; BALIEIRO, F. C.; FONTES, M. A.; CHAER, G. M. Understanding the enhanced litter decomposition of mixed-species plantations of *Eucalyptus* and *Acacia mangium*. **Plant and Soil**, v. 423, n. 1-2, p. 141-155, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-017-3491-7>.

SANTOS, F. M.; CHAER, G. M.; DINIZ, A. R.; BALIEIRO, F. C. Nutrient cycling over five years of mixed-species plantations of *Eucalyptus* and *Acacia* on a sandy tropical soil. **Forest Ecology and Management**, v. 384, p. 110-121, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.10.041>.

SANTOS, V. L.; MUCHOVEJ, R. M.; BORGES, A. C.; NEVES, J. C. L.; KASUYA, M. C. M. Vesicular-arbuscular-/ecto-mycorrhiza succession in seedlings of *Eucalyptus* spp. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 32, n. 2, p. 81-86, 2001. DOI: <https://dx.doi.org/10.1590/S1517-83822001000200002>.

SAVANT, N. K.; KORNDÖRFER, G. H.; DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H. Silicon nutrition and sugarcane production: a review. **Journal of Plant Nutrition**, v. 12, n. 22, p. 1853-1903, 1999. DOI: <https://doi.org/10.1080/01904169909365761>.

SILVA, D. F. da; PEGORARO, R. F.; MAIA, V. M.; KONDO, M. K.; SOUZA, G. L. O. D.; MOTA, M. F. C. Volatilização de amônia do solo após doses de ureia com inibidores de urease e nitrificação na cultura do abacaxi. **Revista Ceres**, v. 64, n. 3, p. 327-335, 2017. DOI: <https://dx.doi.org/10.1590/0034-737x201764030014>.

SILVA, G. G. C.; NEVES, J. C. L.; ALVAREZ V. V. H.; LEITE, F. P. Nutritional diagnosis for eucalypt by DRIS, M-DRIS e CND. **Scientia Agricola**, v. 61, n. 5, p. 507-515, 2004.

SILVA, H. D.; POGGIANI, F.; COELHO, L. C. Biomassa, concentração e conteúdo de nutrientes em cinco espécies de *Eucalyptus* plantadas em solos de baixa fertilidade. **Silvicultura**, v. 6/7, p. 9-25, 1983a. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/282259/1/hsilva2.pdf> http://www.cnpf.embrapa.br/publica/boletim/boletarqv/boletim06_07/hsilva2.pdf.

SILVA, H. D.; POGGIANI, F.; COELHO, L. C. Eficiência de utilização de nutrientes em cinco espécies de *Eucalyptus*. **Boletim de Pesquisa Florestal**, v. 6/7, p. 1-8, 1983b. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/282256>.

SILVA, M. A.; COSTA, M. D.; ROCHA, R. B.; BORGES, A. C. Formação de ectomicorizas por monócários e dicários de *Pisolithus* sp. e interações nutricionais em *Eucalyptus grandis*. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 5, p. 917-929, 2007.

SOARES, M. T. S.; FROUFE, L. C. M. Estimativa de ciclagem de nutrientes em ecossistemas florestais por meio da produção e decomposição de serapilheira. In: PARRON, L. M.; GARCIA, J. R.; OLIVEIRA, E. B.; BROWN, G. G.; PRADO, R. B. (org.). **Serviços ambientais em sistemas agrícolas e florestais do Bioma Mata Atlântica**. Brasília, DF: Embrapa, 2015. p. 155-170. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1024484>.

SOARES, M. T. S. **Taxas de mineralização e de lixiviação do nitrogênio, e alterações da fertilidade de um Latossolo Vermelho-Amarelo degradado e outro não-degradado fertilizados com biossólido e florestados com *Eucalyptus grandis***. 2003. 142 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba.

SOARES, M. T. S.; GAIAD, S.; RESENDE, A. S.; MENEZES, G. I.; FERNANDES, F. A.; FERNANDES, A. H. B. M. Qualidade de mudas de espécies arbóreas procedentes do Bioma Pantanal e inoculadas com fungos micorrízicos. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 37, n. 91, p. 311-322, 2017. DOI: <https://doi.org/10.4336/2017.pfb.37.91.1424>.

- SBS. Sociedade Brasileira de Silvicultura. **Fatos e números do Brasil florestal**. São Paulo, 2008. 92 p. Disponível em: <http://www.sbs.org.br/FatoseNumerosdoBrasilFlorestal.pdf>. Acesso em: 27 jun. 2019.
- SOUZA, E. L.; ANTONIOLLI, Z. I.; MACHADO, R. G.; PAZZINI, D. E.; DAHMER, S. F.; REDIN, M.; RAMIRES, M. F. Fungos Ectomicorrízicos na produção de mudas de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex. Maiden em Neossolo Quartzarênico. **Ciência Florestal**, v. 27, n. 2, p. 471-484, 2017.
- SOUZA, I. F. de; BARROS, N. F. de; SILVA, I. R. da; RENIER, R. F.; ÁVILA SILVA, L. de; NOVAIS, R. F. de. Decomposition of eucalypt harvest residues as affected by management practices, climate and soil properties across southeastern Brazil. **Forest Ecology and Management**, 374, 186-194, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.05.012>.
- SOUZA, O. M. M.; COLLICCHIO, E.; PEREIRA, E. Q.; AZEVEDO, M. I. R.; Zoneamento agroclimático para o *Eucalyptus urograndis* no Estado do Tocantins. In: SIMPÓSIO DE GEOTECNOLOGIAS NO PANTANAL, 5., 2014, Campo Grande, MS. **Anais [...]**. São José dos Campos: INPE, 2014. p. 231-239.
- STAPE, J. L.; ANDRADE, S.; GOMES, A. N.; KREJCI, L. C.; RIBEIRO, J. A. Definição de método de preparo do solo para silvicultura em solos coesos no litoral norte da Bahia. In: GONÇALVES, J. L. M.; STAPE, J. L. **Conservação e cultivo de solos para plantações florestais**. Piracicaba: IPEF, 2002. Cap. 7. p. 47-129.
- STAPE, J. L.; BINKLEY, D.; RYAN, M. G.; FONSECA, S.; LOOS, R. A.; TAKAHASHI, E. N.; SILVA, C. R.; SILVA, S. R.; HAKAMADA, R. E.; FERREIRA, J. M. A.; LIMA, A. M. N.; GAVA, J. L.; LEITE, F. P.; ALVES, J. M.; SILVA, G. G. C.; AZEVEDO, M. R. The Brazil *Eucalyptus* potential productivity project: influence of water, nutrients and stand uniformity on wood production. **Forest Ecology and Management**, v. 259, p. 1684–1694, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.01.012>.
- STAPE, J. L.; BINKLEY, D.; RYAN, M. G. Eucalyptus production and the supply, use and efficiency of use of water, light and nitrogen across a geographic gradient in Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 193, p.17–31, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.01.020>.
- TCHICHELLE, S. V.; MARESCHAL, L.; KOUTIKA, L.-S.; EPRON, D. Biomass production, nitrogen accumulation and symbiotic nitrogen fixation in a mixed-species plantation of eucalypt and acacia on a nutrient-poor tropical soil. **Forest Ecology and Management**, v. 403, p. 103-111, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.07.041>.
- THIRKELL, T. J. CAMERON, D. D.; HODGE, A. Resolving the ‘nitrogen paradox’ of arbuscular mycorrhizas: fertilization with organic matter brings considerable benefits for plant nutrition and growth. **Plant, Cell & Environment**, v. 39, n. 8, p. 1683-1690, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1111/pce.12667>.
- TRAJANO, M. A. B.; KASUYA, M. C. M.; TÓTOLA, M. R.; BORGES, A. C.; NOVAIS, R. F. Suprimento de fósforo e formação de micorrizas em mudas de eucalipto em sistema de raízes subdivididas. **Revista Árvore**, v. 25, n. 2, p. 193-201, 2001.
- TRINDADE, A.; PEREIRA, J.; MUCHOVEJ, R.; NEVES, J. Efeito de fungos ectomicorrízicos na resposta de mudas de *Eucalyptus grandis* a enxofre no solo. **Revista Árvore**, v. 25, n. 2, p. 175-181, 2001.
- VANCE, C. P. Symbiotic nitrogen fixation and phosphorus acquisition. Plant nutrition in a world of declining renewable resources. **Plant Physiology**, v. 127, p. 390–397, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1104/pp.010331>.

VENTERINK, H. O. Legume have a higher root phosphatase activity than other forbs, particularly under low inorganic P and N supply. **Plant and Soil**, v. 347, p. 137-146, 2011.

VENTURIN, N.; CAMPINHOS JÚNIOR, E.; MACEDO, R. L. G.; VENTURIN, R. P. Histórico. In: MACHADO, C.; PIRES, J.; VILAR, M.; COSTA, C.; NACIF, A. (ed.). **Eucaliptocultura no Brasil: silvicultura, manejo e ambiência**. Viçosa, MG: SIF, 2014, p.17-38.

VILAS BOAS REZENDE, L.; CAMELLO, T. C. F.; REBELO, L. P. O eucalipto resseca o solo? Mito ou verdade? **Revista Internacional de Ciências**, v. 1, n. 1, p. 19-38, 2011.

VITOUSEK, P. Nutrient cycling and use efficiency. **The American Naturalist**, v. 119, p. 553–572, 1982.

VOIGTLAENDER, M.; LACLAU, J.-P.; GONÇALVES, J. L. M.; PICCOLO, M. C.; MOREIRA, M. Z.; NOUVELLON, Y.; RANGER, J.; BOUILLET, J.-P. Introducing *Acacia mangium* trees in *Eucalyptus grandis* plantations: consequences for soil organic matter stocks and nitrogen mineralization. **Plant and Soil**, v. 352, n. 1/2, p. 99-111, 2012.

WADT, P. G. S.; NOVAIS, R. F.; ALVARES, V. H.; BARROS, N. F.; DIAS, L. E. Variações no estado nutricional de eucaliptos por influência do material genético e da idade da árvore. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 34, n. 10, p. 1797-1803, 1999a.

WADT, P. G. S.; NOVAIS, R. F.; ALVARES V. V. H.; BARROS, N. F. de; DIAS, L. E. Uso de diferentes compartimentos da árvore nos índices DRIS e seus efeitos na avaliação da nutrição nitrogenada em eucaliptos. **Revista Árvore**, v. 23, n. 3, p. 271-278, 1999b.

WADT, P. G. S.; NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. V. H.; FONSECA, S.; BARROS, N. F. Valores de referência para macronutrientes em eucalipto obtidos pelos métodos DRIS e chance matemática. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, p.685-692, 1998a.

WADT, P. G. S.; NOVAIS, R. F.; ALVARES, V. H.; FONSECA, S.; BARROS, N. F.; DIAS, L. E. Três métodos de cálculo do DRIS para avaliar o potencial de resposta à adubação de árvores de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, p. 661-666, 1998b.

WADT, P. G. S.; NOVAIS, R. F. Normas preliminares do sistema integrado de diagnose e recomendação para clones de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. **Scientia Forestalis**, n. 55, p. 145-154, 1999c.

WADT, P. G. S. Nutritional status of *Eucalyptus grandis* clones evaluated by critical level and DRIS method. **Revista Árvore**, v. 28, n. 1, p. 15-20, 2004. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-67622004000100003>.

WALWORTH, J. L.; SUMNER; M. E. The Diagnosis and Recommendation Integrated System (DRIS). In: STEWART, B. A. (ed.). **Advances in Soil Science**. New York: Springer, 1987. v. 6.

WREGGE, M. S.; GOMES, J. B. V.; BOGNOLA, I. A.; HOLLER, W. A. Zoneamento agroclimático do eucalipto para a região da Bacia do Paraná 3 em escala semidetalhada. In: ENCONTRO BRASILEIRO DE SILVICULTURA, 4., 2018, Ribeirão Preto. **Anais [...]**. Brasília, DF: Embrapa; Colombo: Embrapa Florestas, 2018.

WREGGE, M. S.; HIGA, R.; MOURA, M. S. B. de. Modelagem da distribuição geográfica de *Eucalyptus tereticornis* na Região Nordeste do Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 17., 2011, Guarapari. **Riscos climáticos e cenários agrícolas futuros: Anais**. Guarapari: Incaper, 2011. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/897332/1/2011MarcosWCBAMModelagem.pdf>.

WREGÉ, M.; HIGA, R. C. V.; STEINMETZ, S.; HERTER, F.; REISSER JUNIOR, C.; RADIN, B.; MATZENAUER, R. **Crêterios para o zoneamento agroclimático do eucalipto**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2009. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/747139/1/Cap5ZonEucaliptoCPACT2009Incluido.pdf>.

WU, Q. S.; ZOU, Y. N. Mycorrhiza has a direct effect on reactive oxygen metabolism of drought-stressed citrus. **Plant Soil Environment**, v. 55, n. 10, p. 436-442, 2009.

WU, Z.; DIJKSTRA, P.; KOCH, G. W.; PE NUELAS, J.; HUNGATE, B. A. Responses of terrestrial ecosystems to temperature and precipitation change: a meta-analysis of experimental manipulation. **Global Change Biology**, v. 17, p. 927-942, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02302>.

ZHU, X. C.; SONG, F. B.; LIU, S. Q.; LIU, T. D.; ZHOU, X. Arbuscular mycorrhizae improves photosynthesis and water status of *Zea mays* L. under drought stress. **Plant Soil Environment**, v. 58, n. 4, p. 186-191, 2012.

ZONG, K.; HUANG, J.; NARA, K.; CHEN, Y.; SHEN, Z.; LIAN, C. Inoculation of ectomycorrhizal fungi contributes to the survival of tree seedlings in a copper mine tailing. **Journal of Forest Research**, v. 20, n. 6, p. 493-500, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10310-015-0506-1>.