

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO SUDOESTE DA BAHIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

**MINERALIZAÇÃO DE NITROGÊNIO EM SOLOS SOB PLANTAÇÕES DE
EUCALIPTO EM DIFERENTES TEMPOS DE CULTIVO**

ARIANE MIRANDA DE OLIVEIRA

VITÓRIA DA CONQUISTA
BAHIA – BRASIL
JULHO – 2018

ARIANE MIRANDA DE OLIVEIRA

**MINERALIZAÇÃO DE NITROGÊNIO EM SOLOS SOB PLANTAÇÕES DE
EUCALIPTO EM DIFERENTES TEMPOS DE CULTIVO**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, para a obtenção do título de Mestre.

**Orientadora: Prof.^a Patrícia Anjos Bittencourt Barreto-Garcia
(UESB)**

VITÓRIA DA CONQUISTA
BAHIA – BRASIL
JULHO – 2018

ARIANE MIRANDA DE OLIVEIRA

**MINERALIZAÇÃO DE NITROGÊNIO EM SOLOS SOB PLANTAÇÕES DE
EUCALIPTO EM DIFERENTES TEMPOS DE CULTIVO**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, para a obtenção do título de Mestre.

Aprovada em 20 de julho de 2018.

Comissão Examinadora:

Pesq. Bruno José Rodrigues Alves (D.Sc., Agronomia) – Embrapa Agrobiologia

Prof. Joilson Silva Ferreira (D.Sc., Agronomia) – UESB

Prof.^a Patrícia Anjos Bittencourt Barreto-Garcia (D.Sc., Ciências Florestais) – UESB
Orientadora

AGRADECIMENTOS

Serei eternamente grata a todos aqueles que de uma forma ou de outra me ajudaram nessa jornada, em especial:

A Deus, “inteligência suprema e causa primeira de todas as coisas”, que sempre mostrou o caminho a ser seguido, me dando força e me protegendo com todo o seu amor.

Aos meus pais, Ary e Maria Helena, que me proporcionaram esta vida, e ao meu irmão Gustavo, pelas conversas, carinho e amizade. Agradeço à minha segunda família, porém não menos querida, tia Vanyr, tio Pedro, Laila e Rômulo, que foram a base dos meus estudos e da minha formação enquanto pessoa. Agradeço ao meu noivo, Edimilson, por ter sido companheiro, conselheiro e amigo durante todo esse período e à sua família por ter me acolhido. E também aos meus tios Laurete, Vera e Humberto.

À minha orientadora Patrícia A. Bittencourt Barreto-Garcia, que foi a minha base durante esses dois anos e que não poderia ser mais companheira, solícita e gentil.

À Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia, pelo apoio na realização do trabalho.

Ao Prof. Valdomiro Conceição Júnior, por ter cedido as áreas do estudo.

Aos laboratórios de Ciclagem de Nutrientes da Embrapa Agrobiologia, Nutrição Animal e Microbiologia do Solo da Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, por possibilitarem as análises químicas.

Aos colegas do Laboratório de Solos e Biomassa Florestal, pelo auxílio na realização do trabalho e a Maida Cinthya, Priscila Matos e Paulo Monroe pelos conselhos.

Às novas amigas e irmãs da Casa 3, Milena, Ina e Wendy; às antigas do Ap. 102, Silvanete, Camila e Elisângela; e à Izabela Santos, Antônio Júnior e José Maria por tornarem esse período mais confortável.

Aos colegas de mestrado e à Fabrícia por toda ajuda e pelos momentos de descontração que proporcionaram mais leveza nesse tempo.

A todos, muito obrigada!

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1. O cultivo de eucalipto no Brasil	3
2.2. Importância e mineralização do nitrogênio	4
2.3. Nitrogênio em solos sob florestas	6
2.4. Métodos de avaliação da mineralização de N	7
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	10
3.1. Descrição das áreas de coleta	10
3.2. Amostragem do solo, serapilheira e biomassa arbórea	12
3.3. Análises do solo, serapilheira e biomassa arbórea	13
3.4. Mineralização de N e C	13
3.5. Estoque, exportação e estimativa do suprimento de N do solo	15
3.6. Análises estatísticas	16
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	17
4.1. Mineralização de N e C	17
4.2. Biomassa e estimativa do suprimento de N	25
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	28
REFERÊNCIAS	29

RESUMO

OLIVEIRA, Ariane Miranda de. M.Sc., Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, julho de 2018. **Mineralização de nitrogênio em solos sob plantações de eucalipto em diferentes tempos de cultivo.** Orientadora: Patrícia Anjos Bittencourt Barreto-Garcia.

Pesquisas sobre mineralização de nitrogênio e carbono no solo são potenciais indicadoras da disponibilidade de N para as culturas. Assim, objetivou-se com o presente estudo avaliar o efeito dos ciclos de cultivo de eucalipto sobre as reservas de nitrogênio e carbono potencialmente mineralizáveis do solo e estimar o número de rotações de cultivo supridas pelo nitrogênio dessas reservas em plantios de *Eucalyptus urophylla* que não receberam adubação nitrogenada. O estudo foi conduzido em plantações comerciais de *Eucalyptus urophylla* em primeira, segunda e terceira rotação, tendo como referência uma área de Floresta Estacional Decidual Submontana. Foram alocadas quatro unidades experimentais de 400 m² em cada área, onde realizaram-se coletas de amostras de solo deformadas (camada 0-10 cm) e indeformadas; de serapilheira acumulada e de biomassa arbórea. A partir da incubação aeróbia das amostras de solo durante 24 semanas, obteve-se as quantidades de nitrogênio e carbono mineralizados, que foram utilizadas para estimar o potencial de mineralização de N e C dos solos. Além disso, foram determinados os teores de N total do solo, da serapilheira e da biomassa arbórea. Os solos sob eucalipto em diferentes rotações e floresta nativa possuem capacidade similar de mineralizar N e C, com potenciais de mineralização médios de 47,6 e 597,2 mg kg⁻¹ de solo, respectivamente. O cultivo de eucalipto por até 14 anos não altera o potencial de mineralização de nitrogênio e de carbono do solo em relação à floresta nativa. As reservas de nitrogênio do solo são suficientes para suprir a demanda de N pelas árvores de eucalipto por aproximadamente 3,5 rotações de cultivo.

Palavras-chave: *Eucalyptus urophylla*, N mineralizado, matéria orgânica, ciclagem de nutrientes.

ABSTRACT

OLIVEIRA, Ariane Miranda de. M.Sc., Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, July, 2018. **Nitrogen mineralization in soils under eucalyptus plantations in different cultivation times.** Adviser: Patrícia Anjos Bittencourt Barreto-Garcia.

Researches about nitrogen and carbon mineralization in the soil are potential indicators of N availability for crops. Thus, the objective of this study was to evaluate the effect of the eucalyptus cultivation cycles on nitrogen and carbon potential mineralizations of the soil and to estimate the number of crop rotations supplied by the nitrogen from these reserves in plantations of *Eucalyptus urophylla* that did not receive nitrogen fertilization. The study was carried out in commercial plantations of *Eucalyptus urophylla* in the first, second and third rotation and in the Submontana Decidua Seasonal Forest area, taken as reference. Four experimental units of 400 m² were allocated in each area, where samples of deformed soil (layer 0-10 cm) and undeformed samples were taken; accumulated litter and tree biomass. From the aerobic incubation of the soils for 24 weeks the mineralized nitrogen and carbon contents were obtained, which were used to estimate the N and C mineralization potential of the soils. The total N content of soils, litter and tree biomass were also determined. The soils under eucalyptus in different rotations and native forest have similar capacity to mineralize N and C and an average potential of mineralization of these nutrients of 47.6 and 597.2 mg kg⁻¹ of soil, respectively. Eucalyptus cultivation for up to 14 years does not alter the nitrogen and carbon mineralization potential of the soil in relation to the native forest. Soil nitrogen reserves are sufficient to supply the demand for N by eucalyptus trees for approximately 3.5 crop rotations.

Keywords: *Eucalyptus urophylla*, N mineralized, organic matter, nutrient cycling.

1. INTRODUÇÃO

O Brasil possui, atualmente, cerca de 5,8 milhões de hectares de plantações florestais de *Eucalyptus* spp. e lidera a produtividade mundial de madeira do gênero, com uma média de 35,7 m³ ha⁻¹ ano⁻¹. Isso resulta das condições edafoclimáticas favoráveis do país e da alta tecnologia empregada pelas empresas florestais (IBÁ, 2017). Para garantir essa elevada produtividade, o suprimento de nutrientes por meio da aplicação de fertilizantes é uma etapa primordial, especialmente pelo fato de a grande maioria das plantações de eucalipto ocuparem áreas com solos de baixa fertilidade (MORA e GARCIA, 2000).

Dentre os elementos essenciais, o nitrogênio é um dos mais requeridos pelas plantas e, por essa razão, costuma ser exportado em grandes quantidades nos cultivos agrícolas e florestais. No caso das plantações de eucalipto, o uso de técnicas conservacionistas de manejo dos resíduos de colheita, como a manutenção das folhas no campo, evita a exportação de 19,2 g de nitrogênio por quilograma de biomassa produzida pelo eucalipto em cada ciclo de cultivo (PULITO, 2009). Ainda assim, cerca de 1,3 kg de N são exportados do solo via madeira e casca a cada tonelada de biomassa retirada com a colheita (VIEIRA et al., 2015), tornando necessária a adição de adubos nitrogenados ao solo para suprimento da demanda de N pelo eucalipto. Apesar disso, o eucalipto tem baixa resposta à fertilização nitrogenada (BARROS et al., 1990; GONÇALVES et al., 2000). Isso indica que a mineralização das reservas orgânicas de nitrogênio do solo estaria suprindo a demanda das plantas ao longo do ciclo do eucalipto (GONÇALVES et al., 2001; GAMA-RODRIGUES et al., 2005).

Por outro lado, tais indícios também levam à suposição de que, após vários ciclos de cultivo, poderá ocorrer redução das reservas de N orgânico potencialmente mineralizável do solo e, nessa condição, as florestas de eucalipto passarão a apresentar maior resposta à adubação nitrogenada (GONÇALVES et al., 2001). A diminuição do N do solo também está estreitamente relacionada à redução das fontes de C facilmente mineralizáveis, já que os microrganismos decompositores consomem carbono dos resíduos vegetais enquanto realizam a transformação de N orgânico em N mineral (GONÇALVES, 1995). Nesse contexto, pesquisas sobre mineralização de nitrogênio e de carbono podem constituir um potencial indicador da

disponibilidade de N para as culturas e da necessidade de utilização de adubos nitrogenados como complemento para suprir sua demanda (LI et al., 2003; LACLAU et al., 2010).

O processo de mineralização resulta da degradação de formas orgânicas de N e C em formas inorgânicas simples (como NH_4^+ e NO_3^- , no caso de N; e CO_2 , no caso do C), exercida por microrganismos do solo (CAMARGO et al., 2008). Os estudos de mineralização normalmente ocorrem por meio de incubações aeróbias em laboratório, que fornecem estimativas satisfatórias da fração potencialmente mineralizável do N ou do C orgânico do solo. Para explicar o comportamento da mineralização ao longo do tempo e determinar esta fração, são empregados modelos matemáticos que melhor se ajustem aos dados obtidos, como exponencial simples (STANFORD e SMITH, 1972), exponencial duplo (MOLINA et al., 1980), parabólico (BROADBENT, 1986), sigmoidal (NUNES et al., 2015) e linear simples (GONÇALVES et al., 2001).

Apesar das evidências de que a mineralização de nitrogênio exerce importante papel no suprimento desse elemento em plantações de eucalipto, as informações disponíveis até então não permitem maiores considerações sobre a dinâmica do nitrogênio ao longo do tempo de cultivo. Os estudos realizados até o presente se restringem a comparações entre sistemas florestais nativos e plantados com eucalipto e pinus (GONÇALVES et al., 2001), entre povoamentos de eucalipto de diferentes idades, porém no mesmo ciclo de produção (BARRETO et al., 2010) e entre plantios de espécies leguminosas, floresta nativa e pastagens degradadas (NUNES et al., 2015). Dessa forma, objetivou-se com o presente estudo, avaliar o efeito dos ciclos de cultivo de eucalipto sobre as reservas de nitrogênio e carbono potencialmente mineralizáveis do solo e estimar o número de rotações de cultivo supridas pelo nitrogênio dessas reservas em plantios de *Eucalyptus urophylla* que não receberam adubação nitrogenada.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. O cultivo de eucalipto no Brasil

O gênero *Eucalyptus* é composto por aproximadamente 730 espécies, em sua maioria nativas da Oceania e que apresentam aptidão para variados produtos madeireiros e não madeireiros (PINTO JÚNIOR et al., 2014). As flores permitem a produção de mel, as sementes possibilitam a reprodução e as folhas são base para a produção de óleos destinados à indústria de cosméticos, higiene pessoal, alimentícia e farmacêutica. Os galhos costumam ser utilizados como biomassa ou deixados no campo para proteção do solo e manutenção da sua fertilidade. Já a casca gera substrato usado na produção de mudas. Contudo, a porção da planta mais versátil é o lenho, que dá origem a diversos produtos e subprodutos como carvão, biomassa, madeira serrada, laminados, madeira roliça e cavacos, dos quais se extrai celulose ou lignina e diversos outros produtos (IBÁ, 2016).

No Brasil, as espécies mais comumente cultivadas em plantios comerciais são *Eucalyptus grandis*, *E. urophylla*, *E. saligna* e *E. camaldulensis* (SANTOS, 2010) e *E. viminalis*, havendo predominância, sobretudo, de clones de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, denominados “urograndis” (PINTO JÚNIOR et al., 2014). Segundo esses autores, a preferência por essas espécies está relacionada à sua adaptação a variações climáticas, além do rápido crescimento, com ciclos de corte próximos dos sete anos, e alta produtividade.

Além de os produtos de base florestal abastecerem o mercado interno do Brasil, o país exporta grandes quantidades para a Argentina, Chile, Estados Unidos, Europa e China. As maiores áreas cultivadas com eucalipto no país encontram-se nos estados de Minas Gerais, São Paulo e Mato Grosso do Sul. A Bahia ocupa a quarta posição, possuindo cerca de 612 mil hectares plantados com eucalipto (IBÁ, 2017).

2.2. Importância e mineralização do nitrogênio

O nitrogênio desempenha funções vitais nos vegetais, participando da constituição da molécula de clorofila e, conseqüentemente, do processo de fotossíntese e da síntese de aminoácidos que compõem as proteínas e vitaminas (MARSCHNER, 1995). Em decorrência disso, esse elemento está diretamente ligado ao aumento de biomassa das espécies vegetais (LARCHER, 2004) e consiste no nutriente mais requerido, em termos quantitativos, pelas plantas superiores (MARSCHNER, 1995). Devido a isso e aos baixos teores de N inorgânico (Ni), a disponibilidade de N no solo se constitui em uma das maiores preocupações na condução de cultivos agrícolas e florestais em solos tropicais.

A litosfera, porção terrestre composta pelas rochas, compreende o maior reservatório de nitrogênio do planeta, concentrando em si 98% de todo o elemento. Os outros 2% estão na atmosfera, predominantemente na forma do gás N₂, o qual representa 78% da composição gasosa desse compartimento (PAUL e CLARK, 1996). O nitrogênio gasoso da atmosfera (N₂) consiste na principal fonte primária de N para as plantas (PAULA e AGUIAR, 1998), que posteriormente entrará no solo por meio da precipitação pluviométrica e da fixação biológica do N₂, promovida pela relação de simbiose entre plantas e microrganismos específicos (LARCHER, 2004). A mineralização do N orgânico (N org) também constitui outra forma relevante de introdução de nitrogênio no compartimento inorgânico do solo (BUSTAMANTE et al., 2004).

O N orgânico representa grande proporção do N total presente no solo, cerca de 95%. Por essa razão, a matéria orgânica do solo constitui a principal fonte desse nutriente para as plantas, em termos quantitativos (HESSE, 1971 apud VILELA e PROCTOR, 1996). De acordo com Whitholter (2000), o N total compreende de 0,05 a 0,5% do solo, todavia a quantidade de N disponível para as plantas equivale a apenas 5% ou menos desse valor.

A mineralização do N consiste basicamente na transformação do N orgânico em N inorgânico por meio da ação de microrganismos heterotróficos presentes no solo. Esses microrganismos degradam a matéria orgânica do solo para obter nutriente e energia e, como consequência, liberam nitrogênio mineral para as

plantas, principalmente na forma de amônio (NH_4^+) e nitrato (NO_3^-) (CAMARGO et al., 2008).

Dentre as etapas iniciais do processo de mineralização, a mais expressiva é denominada de amonificação e consiste na transformação do N orgânico em amônio, por ação de agentes decompositores. A etapa seguinte é chamada de nitrificação e compreende a formação de compostos de nitrato e nitrito (NO_2^-) a partir da ação dos microrganismos sobre o amônio (CAMARGO et al., 2008). Ambas as formas inorgânicas de amônio e nitrato são absorvidas pelas plantas, entretanto as espécies do gênero *Eucalyptus* no Brasil absorvem, preferencialmente, o nitrogênio na forma de NH_4^+ (GRESPLAN, 1998).

A mineralização do N está diretamente ligada à quantidade e qualidade da matéria orgânica do solo e dependente de fatores como umidade, temperatura, pH e textura do solo (GONÇALVES, 2001). Para Khanna (1990), a quantidade de N no solo também pode ser influenciada pela lixiviação, desnitrificação e absorção das plantas. Além dos fatores citados, a imobilização de N pela biota edáfica também pode ocasionar redução da disponibilidade de N no solo. De acordo com Brookes et al. (1985), os microrganismos são capazes de imobilizar até metade do amônio mineralizado.

O estudo da mineralização de carbono auxilia no entendimento da mineralização de nitrogênio, uma vez que ambos os processos são resultantes da decomposição da matéria orgânica. A mineralização de N acontece ao mesmo tempo em que ocorre a liberação de gás carbônico, resultante da respiração dos microrganismos, durante a degradação dos resíduos vegetais e animais do solo (GONÇALVES, 1995). Dessa forma, maiores taxas de liberação de CO_2 na decomposição da matéria orgânica tendem a estar relacionadas com maiores teores de N nos solos (REZENDE et al., 1999; BARRETO et al., 2010).

Por meio de ensaios de mineralização de nitrogênio, pode-se obter informações importantes sobre a fertilidade do solo no que tange a este nutriente, como as quantidades de nitrogênio total (N total), nitrogênio orgânico (N org.), nitrogênio potencialmente mineralizável (N_o) e nitrogênio inorgânico (Ni) do solo (SAINJU et al., 2012).

2.3. Nitrogênio em solos sob florestas

O nitrogênio constitui o nutriente geralmente mais absorvido e acumulado em maiores quantidades em plantações de eucalipto (POGGIANI et al., 1983; SANTANA et al., 1999). Plantios de eucalipto, no Brasil, aos seis anos e meio de idade, podem acumular na sua parte aérea entre 217 e 483 kg deste nutriente por hectare (SANTANA et al., 2008). Esses valores de absorção estão associados à produtividade dos povoamentos, ou seja, maiores acúmulos de nitrogênio tendem a ocorrer em plantios mais produtivos (BARROS et al., 1990).

De acordo com Miller (1981) e Laclau et al. (2003), o nitrogênio absorvido pelas árvores antes de formarem dossel é proveniente das reservas presentes no solo. A partir do momento em que se estabelece o dossel e ocorre o aumento do acúmulo de serapilheira sobre o piso florestal, a ciclagem de nutrientes (bioquímica e biogeoquímica) passa a ser responsável pela disponibilização de grande parte do nitrogênio requerido pelo eucalipto. Ou seja, nesta etapa, segundo esses autores, ocorre retorno do nutriente pela decomposição do material orgânico depositado no solo e, também, pela redistribuição interna.

Laclau et al. (2004), em plantio de eucalipto com seis anos de idade sob condições tropicais no Congo, verificaram que a decomposição da serapilheira promovia a liberação de $44 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de N. Cunha et al. (2005), estudando plantios de eucalipto em primeira e segunda rotação no estado do Rio de Janeiro, observaram que um quilo de serapilheira concentra valores entre 27 e 28 g de nitrogênio. Estes valores se tornam expressivos frente à grande quantidade de serapilheira aportada pelo eucalipto anualmente. Cunha Neto et al. (2013), estudando povoamentos do híbrido *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, no estado de Minas Gerais, com três anos e meio de idade, observaram produção de serapilheira de $8,8 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Santos Neto et al. (2015), em plantios de *Eucalyptus urophylla*, no Sudoeste da Bahia, constataram aporte mensal correspondente a $522,6 \text{ kg ha}^{-1}$.

A elevada contribuição da ciclagem biogeoquímica para o suprimento de N pode explicar a baixa intensidade de resposta dos cultivos de eucalipto à adubação nitrogenada (BARROS et al., 1990; GAMA-RODRIGUES, 1997; GONÇALVES et al.,

2000). Por outro lado, especula-se que essas reservas de N orgânico se reduzam ao longo dos anos devido ao cultivo florestal contínuo.

Até o presente, as informações disponíveis na literatura sobre mineralização de nitrogênio em solos sob cultivos florestais, no Brasil, restringem-se a comparações entre sistemas florestais nativos e plantados com eucalipto e pinus (GONÇALVES et al., 2001), entre eucaliptos de diferentes idades (BARRETO et al., 2010) e entre plantios de espécies leguminosas, com floresta nativa e pastagens degradadas (NUNES et al., 2015). Além desses, existe também o estudo de Pulito (2009), que relacionou a mineralização de N em diferentes povoamentos de eucalipto em resposta à adubação nitrogenada em diferentes estágios de desenvolvimento. Ainda não existem, entretanto, registros de estudos que avaliem o efeito do tempo de cultivo do eucalipto sobre a mineralização de N e os estoques de N potencialmente mineralizável em solos brasileiros.

A hipótese de que a disponibilidade de nitrogênio para as plantas de eucalipto é reduzida com as consecutivas explorações florestais é embasada no fato de que quantidades consideráveis de N são exportadas através da colheita da madeira (VIERA et al., 2015) e de que a diminuição do N está estreitamente relacionada à diminuição das fontes de C facilmente mineralizáveis. Isso levaria ao aumento da intensidade de resposta do eucalipto à adubação nitrogenada e, provavelmente, da necessidade de adição desses fertilizantes, o que pode elevar os custos dos empreendimentos florestais (LACLAU et al., 2010). Dessa forma, estudos sobre a mineralização de N em solos sob diferentes ciclos de cultivo de eucalipto podem auxiliar na identificação do potencial de suprimento das reservas orgânicas de nitrogênio, fornecendo subsídios para uma utilização mais racional de adubos nitrogenados, sem comprometimento da produtividade.

2.4. Métodos de avaliação da mineralização de N

As avaliações de mineralização de nitrogênio atualmente se baseiam em métodos químicos ou biológicos propostos, sobretudo, a partir da década de 1960. O método químico mais comumente utilizado foi proposto por Keeney e Bremner (1966) e consiste no fracionamento do N presente no solo. Segundo Kuhnen (2013), apesar da demora e dificuldade de execução, a técnica possibilita averiguar a fração

de N que mais disponibiliza esse nutriente para as plantas e a interferência do manejo nessa disponibilidade.

Os métodos biológicos são representados pelas incubações aeróbias, ou de longo prazo, e anaeróbias, ou de curto prazo. Enquanto as primeiras podem ser desenvolvidas tanto em laboratório quanto *in situ*, as últimas normalmente estão restritas a laboratório. O estudo da mineralização de nitrogênio *in situ* geralmente é realizado através dos métodos dos sacos enterrados, tubos cobertos e da resina trocadora de íons, propostos por Eno (1960), Adans e Attiwill (1986) e Distefano e Gohls (1986), respectivamente (KUHNNEN, 2013).

Os ensaios de mineralização de N em laboratório têm como princípio a incubação de solos e a extração periódica de lixiviados da solução do solo sob temperatura e umidade constantes. Contudo essa incubação pode ocorrer na presença ou ausência de oxigênio (PAUL e JUNA, 1981 apud ADANS e ATTIWILL, 1986). A incubação anaeróbia, proposta por Keeney e Bremner (1966), consiste em submeter amostras de solo à ausência de O₂ e temperatura de 40 °C durante sete dias. Por outro lado, a metodologia de incubação aeróbia, proposta por Stanford e Smith (1972), estabelece a submissão de amostras de solo a uma temperatura constante de 35 °C e controle de umidade ao longo de 30 semanas. A segunda metodologia possui como vantagem o fato de possibilitar a obtenção de estimativas do N potencialmente mineralizável do solo (KUHNNEN, 2013). Luce et al. (2011) consideram que a incubação aeróbia faz uma simulação da mineralização de N mais aproximada das condições de campo, quando comparada à anaeróbia.

A obtenção de estimativas de nitrogênio potencialmente mineralizável (N_o), porção do N do solo capaz de se tornar disponível às plantas, de solos incubados na presença de oxigênio, geralmente ocorre através da aplicação de modelos matemáticos não lineares que melhor se ajustam aos dados obtidos nos ensaios. Os modelos comumente utilizados são o exponencial simples (STANFORD e SMITH, 1972; MARION et al., 1981; JONES, 1984; CABRERA, 1993), exponencial duplo (MOLINA et al., 1980; INOBUSHI et al., 1985), parabólico (BROADBENT, 1986), hiperbólico (JUMA et al., 1985), linear simples (GONÇALVES et al., 2001) e sigmoidal (NUNES et al., 2015). Os modelos não lineares do tipo exponencial duplo consideram a existência de pelo menos dois compartimentos de nitrogênio no solo, um mais facilmente decomponível e outro mais recalcitrante. Por outro lado, os

exponenciais e lineares simples são utilizados quando se admite apenas um compartimento (PEREIRA, 2006).

De acordo com Yagi et al. (2009), o uso de modelos com diversas variáveis promove melhores ajustes, mas também dificulta a compreensão dos resultados, sendo preferível a escolha de modelos mais simples. Ao estudar a mineralização de nitrogênio em *Eucalyptus grandis* e *Pinus caribaea*, Gonçalves et al. (2001) constataram que o modelo que melhor se ajustou aos dados obtidos foi o linear simples. Já Nunes et al. (2015), avaliando solos sob *Acacia auriculiformis* e *Mimosa caesalpiniiifolia*, verificaram estimativas satisfatórias de N_0 através do ajuste de modelo sigmoidal. Para a mineralização de carbono é comum o uso do modelo exponencial simples (também denominado de exponencial de crescimento), proposto por Stanford e Smith (1972) e adotado por Mantovani et al. (2006), Barreto et al. (2010), Andrade et al. (2013) e Marchetti et al. (2015), e o sigmoidal utilizado por Nunes et al. (2015).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Descrição das áreas de coleta

O estudo foi conduzido em plantações comerciais de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake, localizadas no município de Vitória da Conquista, estado da Bahia, Brasil. Foram selecionadas áreas cultivadas com eucalipto a quatro, nove e catorze anos, que constituíam, nessa ordem, primeira, segunda e terceira rotação (Figura 1). Nas áreas de segunda e terceira rotação foram adotados ciclos de corte de cinco anos. As demais informações específicas de cada plantio de eucalipto encontram-se na Tabela 1.

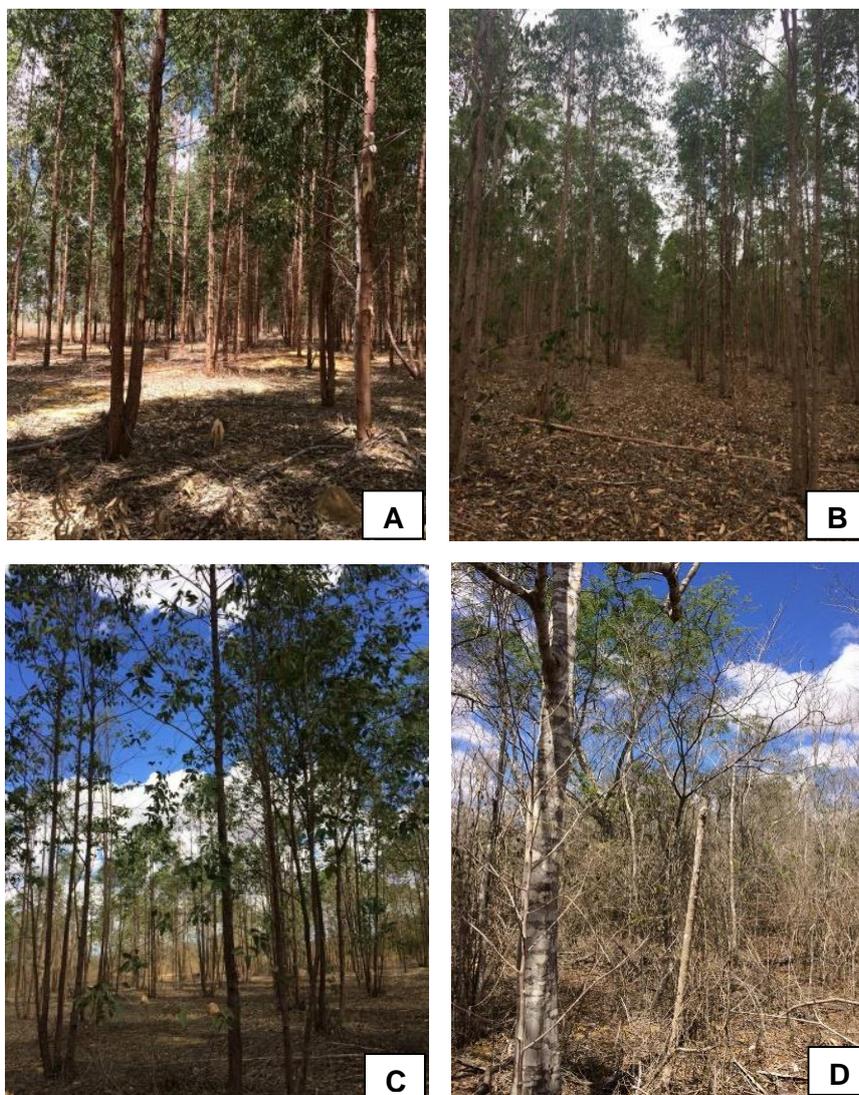


Figura 1 – Visão das áreas de cultivo de eucalipto em primeira rotação (A), segunda rotação (B) e terceira rotação (C) e de Floresta nativa (D).

Tabela 1 – Informações sobre as áreas de estudo e volume de madeira dos povoamentos de eucalipto em diferentes rotações

Tratamento	Localização	Tempo de cultivo (anos)	Espaçamento	Volume (m ³ ha ⁻¹)
1ª rotação	14° 49' S e 40° 59' O	4,0	3 m x 4 m	102,60
2ª rotação	14° 50' S e 40° 59' O	9,0	3 m x 3 m	49,44
3ª rotação	14° 50' S e 40° 59' O	14,0	3 m x 3 m	83,05

Além de serem compostas de uma mesma espécie, as áreas de eucalipto apresentavam condições semelhantes de solo, plantio e manejo cultural. Os solos possuem textura argiloarenosa, pertencem à mesma classe, Latossolo Amarelo Distrófico (EMBRAPA, 2013) e apresentam baixa fertilidade natural, conforme a classificação de Alvarez et al. (1999) (Tabela 2).

Tabela 2 – Atributos químicos e físicos de solos sob eucalipto em diferentes rotações e floresta nativa na camada 0-10 cm de profundidade

Área	pH	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al
		mg dm ⁻³	-----cmolc dm ⁻³ -----				
1ª rotação	4,5	1,0	0,15	0,5	0,5	1,2	5,6
2ª rotação	4,6	1,0	0,12	0,7	0,7	0,9	6,4
3ª rotação	4,4	2,3	0,13	0,4	0,8	1,3	6,9
Floresta nativa	4,7	1,5	0,18	0,8	0,8	0,8	6,0
		Areia	Silte	Argila	Densidade		
		-----g kg ⁻¹ -----			-----g cm ⁻³ -----		
1ª rotação		550	80	370	1,17		
2ª rotação		470	70	460	1,11		
3ª rotação		455	75	470	1,23		
Floresta nativa		580	50	370	1,18		

A caracterização do solo foi realizada de acordo com EMBRAPA (2017), por meio de análise granulométrica (método da pipeta) e de análises químicas de pH em água; P e K (extraíveis por Mehlich-1), Ca, Mg e Al trocáveis (extraíveis por KCl 1 mol L⁻¹).

Os povoamentos foram implantados em áreas ocupadas anteriormente por pastagens degradadas, a partir do plantio de mudas seminais, preparo do solo com subsolagem nas linhas de plantio (50 cm de profundidade) e adubação localizada na

cova (300 g de superfosfato simples). As manutenções foram realizadas apenas até os 12 meses após o plantio, com controle de mato-competição por meio de capinas nas linhas e nas entrelinhas. As plantações em segundo e terceiro ciclo foram conduzidas por talhadia, com a manutenção de dois ou três brotos por cepa.

Um fragmento de floresta nativa, com solo de mesma classe, foi utilizado como referência (Figura 1). O fragmento possui área total de 20,0 ha, está localizado a 14° 51' S e 40° 58' O e tem vegetação classificada como Floresta Estacional Decidual Submontana, com predominância de espécies da família Fabaceae, sobretudo do gênero *Parapiptadenia* (IBGE, 2012).

A região possui relevo plano a levemente ondulado e clima Cwb, tropical de altitude, com inverno seco e verões chuvosos, segundo a classificação de Koppen. A temperatura e precipitação média anual são aproximadamente 21 °C e 700 mm, respectivamente.

3.2. Amostragem do solo, serapilheira e biomassa arbórea

As amostragens de solo foram realizadas no mês de outubro de 2017 e as de serapilheira e biomassa arbórea em dezembro do mesmo ano. Para as coletas de solo, serapilheira e biomassa arbórea foram estabelecidas quatro unidades amostrais de 400 m² em cada um dos plantios florestais e na floresta nativa. A amostragem do solo ocorreu na camada de 0-10 cm de profundidade, com uso de trado holandês a partir de caminamento em zig zag, retirando-se 20 amostras simples para compor uma amostra composta de cada parcela.

A opção de trabalhar com a profundidade 0-10 cm está relacionada ao fato desta representar uma camada de grande deposição de material vegetal e de alta atividade microbiológica. Dessa forma, constitui um compartimento de reserva para a mineralização de N em plantações de eucalipto (GAMA-RODRIGUES et al., 2005; BARRETO et al., 2010). Além das amostras deformadas, também foram coletadas amostras indeformadas de solo, com o auxílio de um anel volumétrico, que foram utilizadas para determinação da umidade gravimétrica e da densidade do solo (BLAKE e HARTGE, 1986; D ANDRÉA, 2004).

A coleta da serapilheira acumulada foi realizada a partir da delimitação de uma área de 2,0 m x 2,0 m (4,0 m²) no entorno do tronco de uma árvore com

diâmetro à altura do peito (DAP) médio por unidade amostral, totalizando quatro amostras em cada plantio florestal. As amostras foram secas (em estufa de ventilação forçada a 65 °C até estabilização da massa seca), pesadas, trituradas em moinho do tipo Wiley e tamisadas em peneiras com malha de 20 mesh. Os resultados de massa seca (g) obtidos foram convertidos em Mg ha⁻¹.

As mesmas árvores que foram referência para a coleta de serapilheira foram utilizadas para quantificação da biomassa arbórea por método destrutivo, adotando-se o procedimento da simples separação (SANQUETA et al., 2004). Cada árvore-amostra foi fracionada nos compartimentos folhas, galhos e fuste com casca, que foram pesados ainda em campo com uso de balança mecânica (capacidade de 150 kg e precisão de 50 g). Depois da pesagem, retiraram-se amostras de cada componente, que foram secas (em estufa a 65 °C até atingirem peso constante) e moídas. A biomassa seca por árvore (kg) foi estimada por meio da multiplicação da massa verde pelo fator de correção de umidade (razão entre a massa seca da amostra e a massa úmida da amostra), convertendo-se os resultados em Mg ha⁻¹.

3.3. Análises do solo, serapilheira e biomassa arbórea

As amostras de solo foram submetidas às determinações dos teores de nitrogênio total (N_{total}), pelo método Kjeldahl, conforme Bataglia et al. (1983), e de C orgânico (C_{org}) por oxidação com dicromato de potássio (K₂Cr₂O₇) 0,4 mol L⁻¹, de acordo com Defelipo e Ribeiro (1981). Assim como para o solo, as amostras de serapilheira e biomassa arbórea também tiveram seus teores N total determinados pelo método Kjeldahl. A partir dos valores de massa seca e seus respectivos teores de N total, foram estimados os estoques de nitrogênio na serapilheira (kg ha⁻¹) e na biomassa arbórea, por componente vegetal e total (kg ha⁻¹).

3.4. Mineralização de N e C

O nitrogênio potencialmente mineralizável foi determinado em laboratório em condições aeróbias, conforme descrito por Stanford e Smith (1972) e alterado por Alves (1989). O método consiste em utilizar 50 g de solo juntamente com 50 g de areia lavada e peneirada, alocando essa combinação em colunas de percolação, em

duplicata. Para tanto, foram utilizados tubos de PVC com diâmetro e altura de 4 e 30 cm, respectivamente, que receberam na porção inferior buchas de lã de vidro para segurar o solo.

A extração do N mineralizado ocorreu através da percolação de 100 mL da solução extratora cloreto de cálcio (CaCl_2) $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ fracionada de 20 em 20 mL e de 50 mL de solução nutritiva desprovida de N. Esta última, composta por sulfato de potássio (K_2SO_4) $0,0025 \text{ mol L}^{-1}$, sulfato de magnésio (MgSO_4) $0,002 \text{ mol L}^{-1}$ e dihidrogenofosfato de cálcio ($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$) $0,005 \text{ mol L}^{-1}$, foi fracionada de 25 em 25 mL. Ao final de cada extração, realizou-se a sucção da solução em excesso nas amostras de solo, a partir da instalação de uma bomba a vácuo que era conectada à parte inferior do tubo (Figura 2). A extremidade superior dos tubos foi vedada com rolha de borracha para evitar a evaporação da água. O tratamento controle foi composto por 100 g de areia lavada. Realizou-se uma extração inicial e outras após períodos sucessivos de 2, 2, 4, 4, 4, 4, e 4 semanas, totalizando 24 semanas de incubação. As soluções lixiviadas das colunas de percolação foram analisadas pelo método espectrofotométrico, para obtenção de nitrogênio mineralizado nas formas de amônio (N-NH_4^+) e nitrato (N-NO_3^-), em espectrofotômetro UV-Vis.

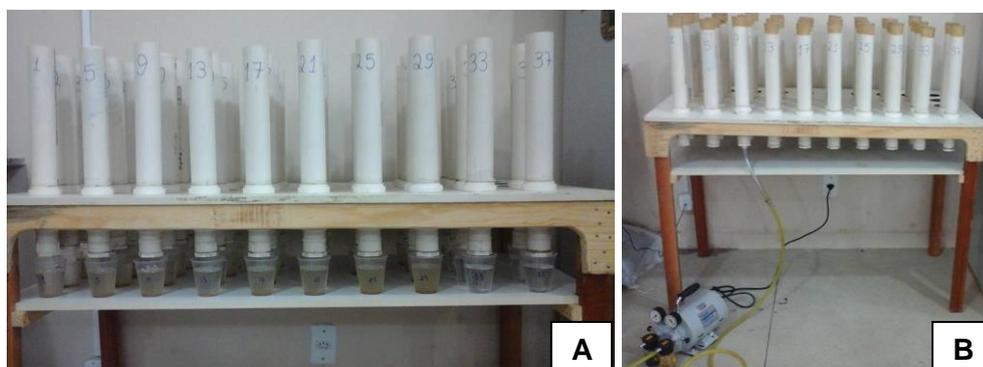


Figura 2 – Extração do N mineralizado através da adição de soluções extratora e nutritiva (A) e sucção dos tubos percoladores com bomba à vácuo para retirada do excesso de solução (B).

A determinação da taxa de mineralização de C do solo ocorreu por meio da instalação de um recipiente de vidro (preso na parte superior de cada percolador por meio de uma haste de plástico) (ARAÚJO et al., 2001; BARRETO et al., 2010; NUNES et al., 2015) contendo 10 mL de NaOH 1 mol L^{-1} para absorção de CO_2 liberado durante a incubação. A solução de NaOH era trocada a cada período de

incubação e, posteriormente, titulada com HCl 0,5 mol L⁻¹ para determinar a quantidade de carbono mineralizado (C-CO₂).

A cinética de mineralização e os potenciais de mineralização de N (N_o) e de carbono (C_o) foram obtidos a partir dos valores acumulados de N mineralizado (nas formas de N-NH₄⁺ e N-NO₃⁻) e de C mineralizado (C-CO₂) durante as 24 semanas de incubação, que foram ajustados a três modelos matemáticos: (1) $Y = X_o (1 - e^{-kt})$, proposto por Stanford e Smith (1972), (2) $Y = X_o + k/t$, proposto por Gonçalves et al. (2001) e (3) $Y = X_o / (1 + e^{-(t-t_0)/k})$, adotado por Nunes et al. (2015), onde Y corresponde ao nitrogênio ou carbono mineralizado acumulado (N_m ou C_m) em mg kg⁻¹, X_o o nitrogênio ou carbono potencialmente mineralizável (N_o ou C_o) em mg kg⁻¹, k a constante de mineralização (semana⁻¹), t₀ o tempo inicial (semanas) e t o tempo de incubação (semanas). Os ajustes foram realizados empregando-se o programa científico de ajuste de curvas SigmaPlot® v.12.0. A partir dos resultados obtidos, determinaram-se as seguintes relações: N_o/N_{total}, N-NH₄⁺/N-NO₃⁻, C_o/C_{org} e C mineralizado/ N mineralizado (C:N_{min}).

3.5. Estoque, exportação e estimativa do suprimento de N do solo

O estoque de N no solo foi obtido através do produto do teor de nitrogênio, densidade do solo e da espessura da camada do solo, conforme equação: EstN = N * ρ * h, onde, EstN representa o estoque de N total do solo (kg ha⁻¹), ρ a densidade média das amostras indeformadas (g cm⁻³), h a espessura da camada amostrada (cm) e N o teor de N total do solo (%). Para efeito de cálculo, o estoque de N foi extrapolado para a camada de 0-20 cm de profundidade, assumindo-se para a camada 10-20 a metade do teor de nitrogênio verificado na camada 0-10 cm.

A quantidade de nitrogênio exportada com a colheita (E) foi estimada com base no N estocado no fuste com casca, considerando a retirada apenas destes componentes e a manutenção dos demais componentes da biomassa arbórea na área. Já a estimativa do suprimento de nitrogênio pela mineralização para as plantações de eucalipto nas diferentes rotações foi obtida através de adaptações na metodologia utilizada por Gonçalves et al. (2001) e Barreto et al. (2010), a partir das equações: (1) $N_r = N_t / (Q + E)$ e (2) $Q = N_o * r$, onde N_r corresponde ao número de rotações supridas pelo N_o estocado no solo; N_t o total de N estocado no solo na

camada de 0-10 cm e 10-20 cm (kg ha^{-1}); Q a quantidade de N mineralizado a cada rotação; E a exportação de nitrogênio após colheita da madeira, por rotação; N_0 o N potencialmente mineralizável na camada de 0-10 cm e 10-20 cm ($\text{kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) e r o número de anos da rotação de cultivo considerada. Adotou-se para o N_0 o mesmo procedimento de extrapolação usado para o estoque de nitrogênio no solo.

3.6. Análises estatísticas

Os dados de N e C mineralizados acumulados, N total, C orgânico e relações $\text{N-NH}_4^+/\text{N-NO}_3^-$, C/N_{min} , biomassa arbórea, N acumulado na biomassa arbórea e estoque de nitrogênio no solo foram submetidos ao teste de homogeneidade (Cochran), normalidade (Bartlett) e à análise de variância segundo um delineamento inteiramente casualizado com quatro repetições, a 5% de significância. Realizou-se a transformação dos dados da porção folha da biomassa arbórea via logaritmo, a fim de torná-los normais e homogêneos. Adotou-se o teste Tukey a 5% de significância para comparação de médias. As análises foram realizadas empregando-se o programa estatístico SAEG® v.9.1.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Mineralização de N e C

Os teores de N total oscilaram entre 0,7 e 1,3 g kg⁻¹ e não mostraram diferenças entre tratamentos (Tabela 3). Esses valores se aproximam dos observados por Pulrolnik et al. (2009) em Latossolo Vermelho-Amarelo sob plantio de *Eucalyptus urophylla* (1,2 g kg⁻¹). Já os teores de carbono orgânico foram superiores na floresta nativa (12,9 g kg⁻¹) em detrimento das florestas de produção (média de 7,6 g kg⁻¹), que não se distinguiram entre si (Tabela 3). Maiores teores de C org em florestas nativas são esperados e normalmente estão associados ao maior tempo de estabelecimento, diversidade de espécies e menor perturbação antrópica, que ocasionam maior acúmulo de resíduos orgânicos (VILLA et al., 2016).

Assim sendo, os menores teores de C encontrados nos solos sob eucalipto indicam que o preparo do solo através da subsolagem pode ter causado uma perda de carbono na sua camada superficial. Por outro lado, a ausência de diferença entre as rotações evidencia que houve manutenção dos teores de C org com o tempo de cultivo, possivelmente em decorrência da ausência de revolvimento do solo entre um ciclo e outro e da retirada apenas do fuste com casca na colheita.

Tabela 3 – N total, C orgânico e mineralização acumulada de N (NH₄⁺+NO₃⁻) e de C (CO₂) após 24 semanas de incubação e relação C:N mineralizado em solos sob eucalipto em diferentes rotações de cultivo e em floresta nativa

Área	N total ^{NS} g kg ⁻¹	C org mg kg ⁻¹	Nm ^{NS}	Cm ^{NS}	C:N mineralizado ^{NS}
1ª rotação	0,7	7,1 b	46,2	509,6	11,3
2ª rotação	0,9	7,4 b	44,9	518,6	11,5
3ª rotação	0,8	8,3 b	43,5	560,0	13,2
Floresta nativa	1,3	12,9 a	45,3	503,5	11,6
Média	0,9	8,9	45,0	522,9	11,9
±S	0,3	2,7	1,1	25,5	0,9

Nm: N mineralizado acumulado; Cm: C mineralizado acumulado; C:N mineralizado: Relação C mineralizado/ N mineralizado; NS: não significativo pelo teste Tukey a 5% de significância; *: significativo pelo mesmo teste, onde letras iguais na coluna indicam que as médias não diferem entre si.

Corroborando o presente estudo, Fernandes et al. (2012) observaram valores médios de C orgânico de 5,3 g kg⁻¹ em Latossolo Amarelo sob *Eucalyptus urophylla* aos cinco anos de idade no estado do Piauí. Gama-Rodrigues et al. (2005), também em solos sob eucalipto e com baixo teor de argila, encontraram valores ainda mais próximos aos observados no presente estudo (média de 7,3 g kg⁻¹).

Após 24 semanas de incubação, os valores acumulados de mineralização de N (Nm) e C (Cm) foram de 45,0 e 522,9 mg kg⁻¹, nessa ordem, e não variaram entre os solos estudados (Tabela 3). Ou seja, não foi observada influência dos ciclos de cultivo do eucalipto nos valores de Nm e Cm, indicando que o uso do solo com eucalipto não modificou o conteúdo e a qualidade da matéria orgânica do solo.

Também não foram observadas diferenças significativas na relação C:N mineralizado dos diferentes tratamentos, que variou entre 11,3 e 13,2 (Tabela 3). Isso também demonstra que o cultivo do eucalipto não afetou o potencial do solo fornecer nitrogênio inorgânico e carbono lábil ao sistema. Barreto et al. (2010) consideram que valores desta relação entre 10 e 16 indicam uma capacidade média do solo transformar C e N orgânicos em compostos inorgânicos. Isso indica uma decomposição mais lenta da matéria orgânica e, conseqüentemente, uma disponibilização de nutrientes via ciclagem biogeoquímica mais gradativa, o que não constituiria um agravante, tendo em vista que se trata de uma cultura perene, com ciclo de corte mínimo de cinco anos.

Dos três modelos testados, apenas o sigmoidal mostrou-se adequado para explicar a cinética de mineralização de N, com valores de regressão significativos (Tabela 4). Em outros estudos, Molina et al. (1980), Broadbent (1986) e Barreto et al. (2010) observaram que os modelos exponencial duplo, parabólico e exponencial simples, respectivamente, foram os mais adequados para descrever a mineralização de N. Por outro lado, corroborando os resultados deste trabalho, Nunes et al. (2015) também observaram melhor ajuste do modelo sigmoidal. De acordo com Alves et al. (1999), desvios na cinética de primeira ordem podem ser observados. Esses autores verificaram desvios em dez de vinte solos estudados, com três tendendo a uma curva sigmoidal.

Essa variação na dinâmica de mineralização de nitrogênio pode estar ligada a diversos fatores, como quantidade e qualidade da matéria orgânica do solo, atividade microbiana (AMELOOT et al., 2013), temperatura e umidade do solo

(GUNTIÑAS et al., 2012). O retardo inicial da mineralização de N, representada pelo modelo sigmoide, pode ser atribuído à existência de uma comunidade microbiana pequena ou de baixa atividade nos solos estudados na fase inicial da pesquisa (ALVES et al., 1999; NUNES et al., 2015). Isso demonstra a necessidade de se estudar a mineralização de nitrogênio em diferentes tipos de solo sob a influência de diferentes coberturas florestais.

Tabela 4 – Nitrogênio potencialmente mineralizável (N_0), constante de mineralização (k_N), estatísticas de ajuste ao modelo sigmoide ($N_m = N_0 / (1 + e^{-(t-t_0)/k})$) e relação $N_0:N$ total de solos sob povoamentos de eucalipto em diferentes rotações

Área	N_0	k_N	r^2	EPE	$N_0:N_t$
	mg kg ⁻¹				%
1ª rotação	49,90	4,8353	0,988*	1,82	7,0
2ª rotação	46,37	4,2660	0,986*	1,95	4,9
3ª rotação	47,65	5,0900	0,984*	1,97	6,3
Floresta nativa	46,37	4,1108	0,989*	1,70	3,6
Média	47,57	4,5755			5,5
± S	1,66	0,4633			1,5

N_0 : N potencialmente mineralizável; k_N : constante de mineralização; r^2 : coeficiente de determinação do ajuste; EPE - erro-padrão da estimativa; * $p < 0,001$; $N_0:N_t$: relação N potencialmente mineralizável/ N total.

As quantidades de N_0 foram muito próximas entre os cultivos de eucalipto e a floresta nativa, variando de 49,9 a 46,3 mg kg⁻¹ (Tabela 4). Isso denota que as plantações de eucalipto em até três rotações (14 anos de cultivo) não alteraram a reserva potencial de N orgânico decomponível do solo. Valores superiores de N_0 foram observados por Barreto et al. (2010), em solos sob plantios de eucalipto (75,4 mg kg⁻¹), e por Nunes et al. (2015), em solo sob plantios de *Acacia auriculiformes* e *Mimosa caesalpiniiifolia* (média de 152,0 mg kg⁻¹). Os resultados observados por estes últimos autores estão atrelados ao fato de ambas as espécies serem fixadoras de nitrogênio, o que aumenta a quantidade desse nutriente no solo e sua disponibilidade para mineralização. Por outro lado, Gonçalves et al. (2001) verificaram média próxima à observada no presente estudo (48,0 mg kg⁻¹ de N_0 na profundidade 0-15 cm).

A constante k_N apresentou menor valor na floresta nativa (4,1 semanas⁻¹) e nas plantações de eucalipto variou entre 4,3 semanas⁻¹ (2ª rotação) e 5,1 semanas⁻¹ (3ª rotação) (Tabela 4). Isso sugere maior mineralização no solo, sob terceiro ciclo de cultivo, no mesmo espaço de tempo que os demais tratamentos e justifica a redução mais acentuada da sua curva após a décima segunda semana na terceira rotação. Tal resultado pode estar relacionado ao maior tempo de cultivo desse tratamento (cerca de 14 anos) e, conseqüentemente, ao maior acúmulo de serapilheira decorrente das colheitas anteriores. Isso estaria proporcionando maiores entradas de N no solo através desses resíduos orgânicos, já que o N estocado na serapilheira foi superior na terceira rotação (245,7 kg ha⁻¹) em relação às outras duas rotações (média de 122,5 kg ha⁻¹).

Tendo por base a relação $N_o:N_t$, os valores de N potencialmente mineralizável representaram de 3,7 a 7,0% do N total do solo (Tabela 4). Tais resultados são próximos aos de Barreto et al. (2010), que encontraram em um solo de textura média argilosa sob eucalipto uma proporção de mineralização de N entre 3,2 e 5,2%, e aos de Camargo et al. (2008), que relatam que aproximadamente 5,0% da reserva de nitrogênio orgânico do solo é mineralizada anualmente. De acordo com Pulito (2009), solos argilosos tendem a possuir maior reserva de N total, mas menores quantidades de N_o quando comparados a solos arenosos, porque estes últimos, por serem mais aerados, oferecem melhores condições de mineralização.

As curvas obtidas a partir do ajuste do modelo sigmoidal (Figura 3) evidenciam uma mineralização lenta no início, seguida de aumentos progressivos, com padrão semelhante entre as rotações de eucalipto, e destas em relação à floresta nativa. Em média, apenas 16% do N mineralizado foi obtido até a quarta semana, atingindo 54% na décima segunda e 70% na décima sexta semana. A partir da décima segunda semana, verificou-se queda da inclinação das curvas de todos os tratamentos, sobretudo no povoamento em terceira rotação, indicando que a partir desse momento houve redução da quantidade de compostos orgânicos nitrogenados mais facilmente decomponíveis nos solos estudados (POTTKER e TEDESCO, 1979; CAMARGO et al., 1997). Valores similares foram obtidos por Nunes et al. (2015) em solos sob espécies florestais leguminosas, onde observaram que, em média, 15%, 57% e 84% da mineralização de N ocorreu até a quarta, décima segunda e décima sexta semana, respectivamente.

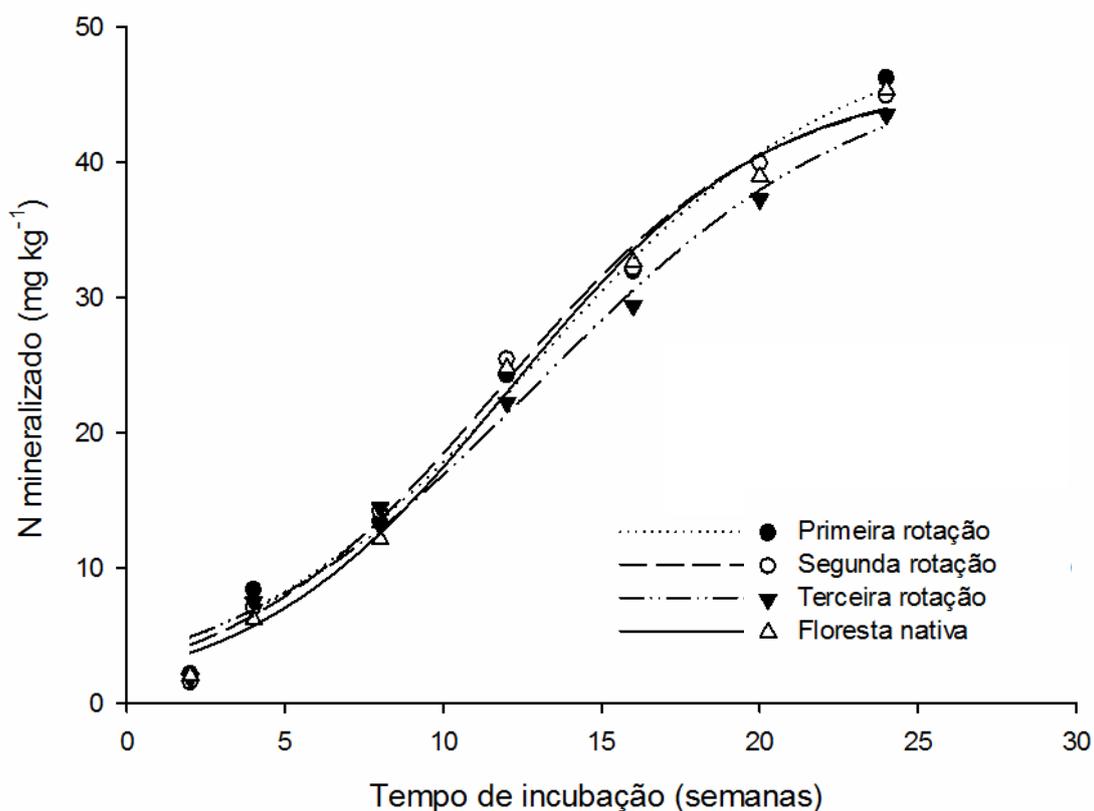


Figura 3 – Curvas de N mineralizado acumulado durante o período de incubação dos solos sob plantações de eucalipto em diferentes rotações, ajustadas ao modelo sigmoidal para obtenção do N_0 .

Quanto à quantidade das formas de N mineralizado no solo ($N-NH_4^+$ e $N-NO_3^-$) após cada período de incubação, observou-se predominância de nitrato, que foi cerca de dez vezes superior ao amônio, em todos os tratamentos (Tabela 5). Também foi possível notar que a liberação de $N-NH_4^+$ foi mais pronunciada no início da incubação, decrescendo gradativamente até o final do experimento, enquanto a produção de nitrato apresentou tendência de aumento, seguida de decréscimo após a décima primeira semana, sugerindo redução do substrato disponível para a biota do solo. Assim, a relação $N-NH_4^+ : N-NO_3^-$ em todos os tratamentos foi igual a 0,1. Tal resultado indica o provável estabelecimento de uma população ativa de microrganismos nitrificantes que potencializaram o processo de transformação do $N-NH_4^+$ em $N-NO_3^-$.

Tabela 5 – Quantidades médias de N mineralizado (N-NH₄⁺ e N-NO₃⁻) nos solos sob plantios de eucalipto em diferentes rotações, ao longo de 24 semanas de incubação, e relação N-NH₄⁺:N-NO₃⁻

Área	Tempo (semanas)									
	0-2		2-4		4-8		8-12		12-16	
	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻
	----- mg kg ⁻¹ -----									
1ª rotação	0,5	1,6	2,2	4,0	0,9	4,6	0,2	10,6	0,3	7,4
2ª rotação	0,6	0,9	1,8	3,7	0,3	6,8	0,5	10,9	0,2	6,5
3ª rotação	0,7	1,0	2,0	3,6	0,2	6,7	0,6	7,4	0,3	6,9
Floresta nativa	0,7	1,3	2,0	1,8	0,3	5,6	0,3	11,6	0,2	7,6
Média	0,6	1,2	2,0	3,3	0,4	5,9	0,4	10,1	0,3	7,1
± S	0,1	0,3	0,2	1,0	0,3	1,0	0,2	1,9	0,1	0,5

	Tempo (semanas)				Mineralização total		NH ₄ ⁺ : NO ₃ ⁻ NS
	16-20		20-24		NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	
	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻			
	----- mg kg ⁻¹ -----						
1ª rotação	0,3	7,7	0,1	6,2	4,5	42,1	0,1
2ª rotação	0,4	7,4	0,2	4,8	4,0	41,1	0,1
3ª rotação	0,1	9,3	0,2	6,2	4,2	41,1	0,1
Floresta nativa	0,2	6,1	0,3	6,1	4,1	40,1	0,1
Média	0,3	7,6	1,7	4,4	4,2	41,1	0,1
± S	0,1	1,3	3,0	2,8	0,2	0,8	0,0

Maiores quantidades de nitrato em relação ao amônio, em solos florestais, também foram constatadas por Krave et al. (2002) e Nunes et al. (2015), que atribuíram esse resultado a um estímulo da atividade da população microbiana especializada no processo de nitrificação, em decorrência das condições favoráveis de temperatura, aeração, umidade e nutrientes do solo. A adição da solução nutritiva desprovida de nitrogênio durante as extrações pode ter melhorado a fertilidade do solo e favorecido os agentes nitrificantes, uma vez que a relação NH₄⁺:NH₃⁻ passou a decrescer a partir das quatro primeiras semanas de incubação. Voigtlaender et al.

(2012), estudando a mineralização *in situ* de nitrogênio em solos sob plantios puros e mistos de *Eucalyptus grandis* e *Acacia mangium*, verificaram que aproximadamente 60% do nitrogênio mineralizado estava na forma de N-NO_3^- .

No que diz respeito à mineralização de carbono, também foi observada relação sigmoidal com o tempo de incubação (Figura 4), com melhor ajuste ao modelo $C_m = C_o/1 + e^{-(t-t_0)/k}$ (Tabela 6). Em média, 41% da mineralização de C ocorreu até a oitava semana, chegando a 59% na décima segunda e 76% na décima sexta semana. Resultados próximos foram encontrados por Barreto et al. (2010), em solos sob eucalipto de diferentes idades, no estado do Espírito Santo, em que observaram 36%, 66% e 76% da mineralização do carbono até a terceira, sétima e décima segunda semana, respectivamente.

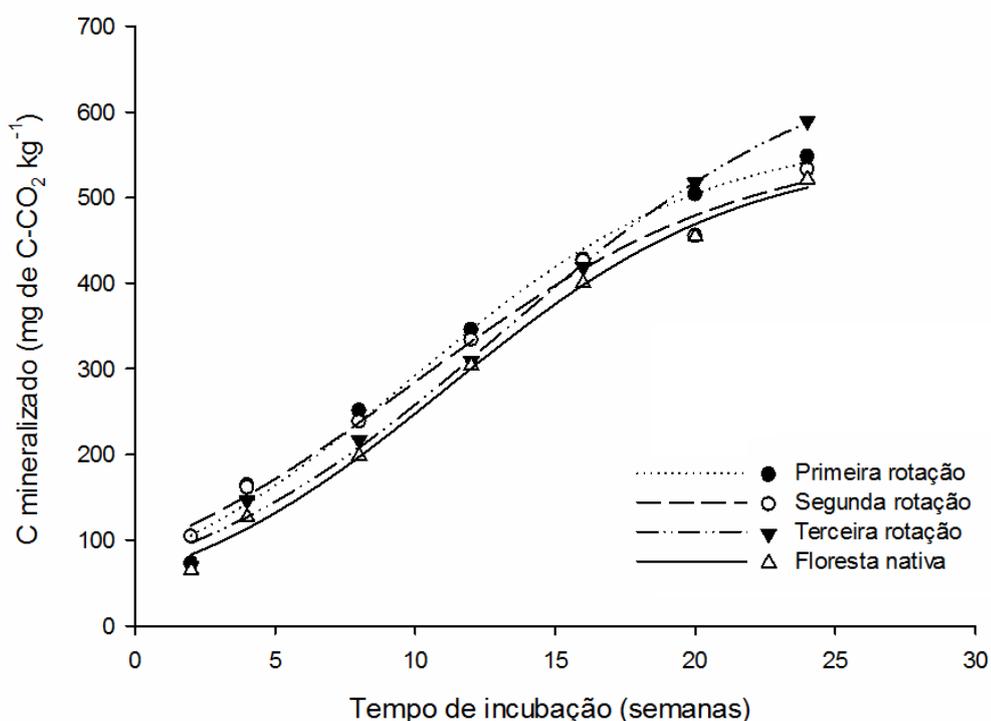


Figura 4 – Curvas de C mineralizado acumulado durante o período de incubação dos solos sob plantações de eucalipto em diferentes rotações, ajustadas ao modelo sigmoidal para obtenção do C_o .

O carbono potencialmente mineralizável (C_o) na floresta nativa foi de 556,1 mg kg^{-1} e variou de 556,9 a 687,6 mg kg^{-1} entre as rotações de eucalipto (Tabela 6). De acordo com a razão $C_o:C_{org}$, estes valores de C_o correspondem a 4,3 e 8,0% de todo o carbono orgânico presente no solo da floresta nativa e dos cultivos de eucalipto, nessa ordem. Em condições de solo parecidas às do presente estudo (Latossolo Vermelho-Amarelo), Nunes et al. (2015) encontraram uma média de

728,76 mg de C-CO₂ kg⁻¹ de solo, ao estudar o efeito das coberturas florestais Acácia, Sabiá e fragmento de Mata Atlântica.

Tabela 6 – Carbono potencialmente mineralizável (C_o), constante de mineralização (k_c), estatísticas de ajuste ao modelo sigmoidal ($C_m = C_o / (1 + e^{-(t-t_0)/k})$) e relação $C_o:C$ orgânico de solos sob povoamentos de eucalipto em diferentes rotações

Área	C_o	k_c	r^2	EPE	$C_o:C$ org
	mg kg ⁻¹				%
1ª rotação	578,10	5,2640	0,985*	21,97	8,1
2ª rotação	566,97	5,9131	0,989*	16,73	7,7
3ª rotação	687,63	6,1486	0,992*	17,36	8,3
Floresta nativa	556,12	5,2568	0,993*	14,31	4,3
Média =	597,21	5,6456			7,1
± S =	60,95	0,4551			1,9

C_o : C potencialmente mineralizável; k_c – constante de mineralização; r^2 : coeficiente de determinação do ajuste; EPE: erro-padrão da estimativa; * $p < 0,001$; $C_o:C$ org- relação C potencialmente mineralizável/ C orgânico.

A média da taxa de mineralização do C (k_c) foi de 5,6 semanas⁻¹ (42,08 dias⁻¹) (Tabela 6), com destaque para a terceira rotação (6,1 semana⁻¹). O maior valor de k_c neste tratamento caracteriza maior mineralização de carbono diária na terceira rotação, corroborando os dados de taxa de mineralização de N. Os valores encontrados no presente estudo são superiores aos observados por Bittar et al. (2013), ao estudarem a mineralização de carbono na camada 0-10 cm, em Minas Gerais, em um solo com características parecidas (Latosolo Amarelo distrófico típico de textura média). Os autores relatam uma taxa de mineralização de 2,5 g de C dia⁻¹ kg⁻¹ de solo.

Ao considerar as quantidades não acumuladas de carbono mineralizado ao final de cada período de incubação, verificou-se padrão semelhante entre os tratamentos estudados (Tabela 7), com decréscimos a partir da décima sexta semana. Em consonância com esse resultado, também foi observada redução das produções de N-NH₄⁺ e N-NO₃⁻ a partir da décima segunda semana (Tabela 5), o que demonstra que a mineralização de N está diretamente associada à oxidação do

C orgânico e que houve diminuição da quantidade de compostos orgânicos facilmente decomponíveis no solo.

Tabela 7 – Quantidades médias de C mineralizado (C-CO₂) em solos sob plantios de eucalipto em diferentes rotações ao longo de 24 semanas de incubação

Área	Tempo (semanas)						
	0 - 2	2 - 4	4 - 8	8 - 12	12 - 16	16 - 20	20 - 24
	----- mg kg ⁻¹ -----						
1° rotação	72,5	91,2	87,1	94,8	81,8	82,6	44,0
2° rotação	104,3	57,0	77,0	95,5	92,2	43,8	77,6
3° rotação	69,9	76,6	70,7	92,1	109,6	104,7	72,3
Floresta nativa	64,9	61,9	71,2	105,6	96,5	60,6	66,8
Média =	77,9	71,7	76,5	97,0	95,0	72,9	65,2
±S =	17,9	15,5	7,6	5,9	11,5	26,5	14,8

4.2. Biomassa e estimativa do suprimento de N

As diferentes rotações de cultivo de eucalipto apresentaram produtividade média de biomassa arbórea que variaram entre 82,1 e 42,4 Mg ha⁻¹, com diferença significativa apenas para o componente folhas, que foi superior na primeira rotação (7,1 Mg ha⁻¹) em relação à terceira (1,3 Mg ha⁻¹). Seguindo padrão contrário, o acúmulo de serapilheira foi superior nesta última rotação e menor na primeira (Tabela 8).

A maior quantidade de folhas no plantio em primeira rotação pode estar relacionada com o maior espaçamento desse povoamento, que diminui a competição por luz pelas plantas ou com o seu regime de manejo (alto fuste), que favoreceu o desenvolvimento da copa. Leles et al. (2001) também observaram que espaçamentos maiores promovem maior produção de biomassa foliar em *Eucalyptus camaldulensis*. Os autores relatam que 6,0% de toda a biomassa das plantas era

representada por folhas em espaçamento 3 m x 4 m, contra 5,4% em espaçamento 3 m x 3 m.

Como reflexo do acúmulo de biomassa, o nitrogênio acumulado na parte aérea das árvores também não variou entre as rotações (Tabela 8), evidenciando a estreita relação entre absorção de N e produção de biomassa (REIS et al., 1987; SANTANA et al., 1999; GONÇALVES et al., 2000; BARRETO et al., 2012). De forma semelhante, como consequência da serapilheira acumulada, foram observadas quantidades superiores de N estocado na serapilheira da terceira rotação em relação às duas rotações iniciais. Esse maior estoque de N corrobora resultados discutidos, podendo justificar a verificação de maiores taxas de mineralização de N e C nesse tratamento.

Tabela 7 – Biomassa florestal, N acumulado na biomassa florestal, estoque de nitrogênio no solo e exportação de N via colheita para povoamentos de eucalipto em diferentes rotações

Área	Biomassa arbórea (Mg ha ⁻¹)				
	Folha	Galho ^{Ns}	Fuste e casca ^{Ns}	Total ^{Ns}	Serapilheira
1ª rotação	7,06 a	13,81	61,23	82,10	14,69 b
2ª rotação	2,24 ab	12,85	27,35	42,43	17,55 ab
3ª rotação	1,27 b	7,28	46,63	55,18	26,00 a
Área	N acumulado (kg ha ⁻¹)				
	Folha ^{Ns}	Galho ^{Ns}	Fuste e casca ^{Ns}	Total ^{Ns}	Serapilheira
1ª rotação	105,64	57,38	122,11	285,13	103,61 b
2ª rotação	43,38	63,12	90,15	196,65	141,31 b
3ª rotação	24,37	36,46	134,30	195,13	245,71 a
Área	EstN no solo (kg ha ⁻¹) ^{Ns}		Exportação de N (kg ha ⁻¹ rotação ⁻¹)		
1ª rotação	1225,66		122,11		
2ª rotação	1575,85		90,15		
3ª rotação	1400,75		134,30		

EstN = Estoque de nitrogênio na camada 0-20 cm de profundidade do solo e Exportação de N = Exportação de nitrogênio via fuste e casca por rotação. Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de significância. Ns= Não significativo pelo teste Tukey a 5% de significância.

Tomando como referência as plantações em primeira e terceira rotação, observou-se que, para atingir a uma produção de 96,8 e 81,2 Mg ha⁻¹ de biomassa total (parte aérea + serapilheira) até quatro anos de idade, o eucalipto apresentou demanda de 388,7 e 440,8 kg ha⁻¹ de N. Nestas rotações, as folhas, galhos e a serapilheira acumulada equivaleram a 35,6 e 34,6 Mg ha⁻¹, o que corresponde, em média, a mais de 39% da biomassa total (Tabela 8). Nesses componentes estão contidos cerca de 69% do estoque de N da biomassa total, o que demonstra o papel relevante do retorno de N por meio da adoção de um sistema de manejo que envolva a manutenção dos resíduos de colheita no campo.

O estoque de N total do solo foi, em média, 1400,8 kg ha⁻¹ e não variou entre as rotações. Por sua vez, o potencial de mineralização de N do solo na profundidade 0-20 cm foi de aproximadamente 84,0 kg ha⁻¹ ano⁻¹. Considerando a colheita do eucalipto aos quatro anos, seriam exportados com a retirada do fuste com casca 162,8 kg de N ha⁻¹ (primeira rotação) e 134,3 kg de N ha⁻¹ (terceira rotação). Dessa forma, pode-se deduzir que os solos do presente estudo possuem um estoque de nitrogênio capaz de suprir a necessidade desse nutriente pelas plantas de eucalipto por aproximadamente três rotações e meia, em média, não se verificando redução dessa previsão com o aumento do tempo de cultivo (Tabela 8).

Valores próximos aos do presente estudo para estimativa de suprimento de N via mineralização em solos sob *E. urophylla* e *E. globulus* foram relatados por Viera et al. (2015). Esses autores verificaram que as reservas de N desses solos eram capazes de suprir a necessidade de N das plantas por 3,8 rotações, considerando a exportação desse nutriente apenas via madeira e casca.

Os resultados encontrados neste trabalho indicam que o nitrogênio mineralizado no solo seria a maior ou uma das maiores fontes desse nutriente para as plantas, uma vez que, mesmo não recebendo adubação nitrogenada, as plantações em primeira, segunda e terceira rotação avaliadas, apresentaram produtividades médias de 102,6; 49,4 e 83,1 m³ ha⁻¹ aos quatro anos de idade (Tabela 1). Isso também é uma comprovação de que as reservas orgânicas de N do solo podem suprir a demanda de N por várias rotações de cultivo e sugere que a pequena resposta do eucalipto à adubação mineral de nitrogênio ocorre porque já existe no solo quantidades expressivas de N.

5. CONCLUSÕES

O cultivo de eucalipto por até 14 anos não altera o potencial de mineralização de nitrogênio e de carbono do solo em relação à floresta nativa.

As reservas de nitrogênio do solo são suficientes para suprir a demanda de N pelas árvores de eucalipto por aproximadamente três rotações e meia de cultivo.

REFERÊNCIAS

- ADAMS, M. A.; ATTIWILL, P. M. Nutrient cycling and nitrogen mineralization in eucalypt forests of south-eastern Australia. II. Indices of nitrogen mineralization. **Plant and Soil**, v. 92, n. 3, p. 341-362, 1986.
- ALVAREZ V., H.; NOVAIS, R. F.; BARROS, N. F.; CANTARUTTI, R. B.; LOPES, A. S. Interpretação dos resultados das análises de solos. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H. (Eds.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**. 5ª aproximação. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. p. 25-32.
- ALVES, G. D. **Mineralização de carbono e nitrogênio em 20 solos do Estado de Pernambuco e absorção de nitrogênio pelo sorgo (*Sorghum bicolor* L. Menchú.)**. Recife-PE: UFRPE, 1989, 75 p. Dissertação (Mestrado em Botânica) – Universidade Federal Rural de Pernambuco.
- AMELOOT, N.; SLEUTEL, S.; DAS, K. C.; KANAGARATNAM, J.; NEVE, S. Biochar amendment to soils with contrasting organic matter level: effects on N mineralization and biological soil properties. **Global Change Biology Bioenergy**, p. 1-10, 2013.
- ANDRADE, C. A.; SILVA, L. F. M.; PIRES, A. M. M.; COSCIONE, A. R. Mineralização do carbono e do nitrogênio após sucessivas aplicações de lodo de esgoto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 48, n. 5, p. 536-544, 2013.
- ARAÚJO, A. M. S.; SAMPAIO, E. V. S. B.; SALCEDO, I. H. Mineralização de carbono e nitrogênio em amostras armazenadas de solo cultivado com cana-de-açúcar, ao longo de dez anos, com e sem fertilização nitrogenada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 43-53, 2001.
- BARRETO, P. A. B.; GAMA-RODRIGUES, A. C.; GAMA-RODRIGUES, E. F.; BARROS, N. F. Nitrogen balance in soil under eucalyptus plantations. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 1239-1248, 2012.
- BARRETO, P. A. B.; GAMA-RODRIGUES, E. F.; GAMA-RODRIGUES, A. C.; BARROS, N. F.; ALVES, B. J. R.; FONSECA, S. Mineralização de nitrogênio e carbono em solos sob plantações de eucalipto, em uma sequência de idades. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 735-745, 2010.
- BARROS, N. F.; NEVES, J. C. L.; NOVAIS, R. F. Fertilização e correção do solo para o plantio de eucalipto. In: BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F. (Eds.). **Relação solo-eucalipto**. Viçosa, Folha de Viçosa, 1990. p.127-186.
- BATAGLIA, O. C., FURLANI, A. M. C., TEIXEIRA, J. P. F., FURLANI, P. R., GALLO, J. R. **Métodos de análise química de plantas**. Campinas-SP: Instituto Agrônomo (Boletim Técnico, 78), 1983. 48 p.

BITTAR, I. M. B.; FERREIRA, A. S.; CORRÊA, G. F. Influência da textura do solo na atividade microbiana, decomposição e mineralização do carbono de serapilheira de sítios do bioma Cerrado sob condições de incubação. **Bioscience Journal**, v. 29, n. 6, p. 1952-1960, 2013.

BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Bulk density. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Pt.1. 2. ed. Madison: ASA, 1986. p. 364-367. (Agronomy, 9).

BROADBENT, F. E. Empirical modeling of soil nitrogen mineralization. **Soil Science**, v. 141, p. 208-213, 1986.

BROOKES, P. C., KRAGT, J. F., POWLSON, D. S., JENKINSON, D. S. Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen the effects of fumigation time and temperature. **Soil Biology and Biochemistry**, v.17, p. 831-836, 1985.

BUSTAMANTE, M. M. C.; MARTINELLI, L. A.; SILVA, D. A.; CAMARGO, P. B.; KLINK, C. A.; DOMINGUES, T. F.; SANTOS, R. V. ¹⁵N natural abundance in woody plants and soils of central brazilian savannas (Cerrado). **Ecological Applications**, v. 14, n. 4, p. 200-213, 2004.

CABRERA, M. L. Modeling the flush of nitrogen mineralization caused by drying and rewetting soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 57, p. 63-66, 1993.

CAMARGO, F. A. O.; SILVA, L. S.; GIANELLO, C.; TEDESCO, M. J. Nitrogênio Orgânico do Solo. In: SANTOS, G. A.; SILVA, L. S.; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F. A. O. (Eds.). **Fundamentos da Matéria Orgânica do Solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2. ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008, p. 87-99.

CAMARGO, F. A. O.; GIANELLO, C.; VIDOR, C. Potencial de mineralização do nitrogênio em solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 21, p. 575-579, 1997.

CUNHA, G. M.; GAMA-RODRIGUES, A. C.; COSTA, G. S. Ciclagem de nutrientes em *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden no Norte Fluminense. **Revista Árvore**, v. 29, n. 3, p. 353-363, 2005.

CUNHA NETO, LELES, P. S. S.; PEREIRA, M. G.; BELLUMATH, V. G. H.; ALONSO, J. M. Acúmulo e decomposição da serapilheira em quatro formações florestais. **Ciência Florestal**, v. 23, n. 3, p. 379-387, 2013.

D'ANDRÉA, A. F.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; GUILHERME, L. R. G. Estoque de carbono e nitrogênio e formas de nitrogênio mineral em um solo submetido a diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 2, p. 179-186, 2004.

DEFELIPO, B. V.; RIBEIRO, A. C. **Análise química do solo: metodologia**. Viçosa-MG: UFV (Boletim de Extensão, 29), 1981. 71 p.

DISTEFANO, J. F.; GHOLZ, H. L. A proposed use of ion exchange resins to measure nitrogen mineralization and nitrification in intact soil cores. **Soil Science and Plant Analysis**, v. 17, n. 9, p. 989-998, 1986.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Brasília, 2013. 353 p.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Embrapa, Brasília, 2017, 573 p.

ENO, C. F. Nitrate production in the field by incubating the soil in polyethylene bags. **Soil Science Society of America Proceedings**, v. 24, p. 277-279, 1960.

FERNANDES, M. M.; CARVALHO, M. G. C.; ARAÚJO, J. M. R.; MELO, F. R.; SILVA, C. A.; SAMPAIO, F. M. T.; LOBATO, M. G. R. Matéria orgânica e biomassa microbiana em plantios de eucalipto no Cerrado Piauiense. **Floresta e Ambiente**, v. 19, n. 4, p. 453-459, 2012.

GAMA-RODRIGUES, E. F.; BARROS, N. F.; GAMA-RODRIGUES, A. C.; SANTOS, G. A. Nitrogênio, carbono e atividade da biomassa microbiana do solo em plantações de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 893-901, 2005.

GAMA-RODRIGUES, E. F. **Carbono e nitrogênio da biomassa microbiana do solo e da serapilheira de povoamentos de eucalipto**. Seropédica-RJ: UFRRJ, 1997, 108 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

GONÇALVES, J. L. M. Efeito do cultivo mínimo sobre a fertilidade do solo e ciclagem de nutrientes. In: 1º SEMINÁRIO SOBRE CULTIVO MÍNIMO DO SOLO EM FLORESTAS, 43, 1995, Curitiba. **Anais...** Curitiba: IPEF, 1995, p. 43-60.

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

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

GRESPLAN, S. L.; DIAS, L. E.; NOVAIS, R. F. Crescimento e parâmetros de absorção de amônio e nitrato por mudas de *Eucalyptus* spp. submetidas a diferentes relações de amônio/nitrato na presença e ausência de fósforo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, p. 667-674, 1998.

GUNTIÑAS, M. E.; LEIRÓS, M. C.; TRASAR-CEPEDA, C.; GIL-SOTRES, F. Effect of moisture and temperature on net soil nitrogen mineralization: a laboratory study. **European Journal of Soil Biology**, v. 48, p. 73-80, 2012.

HESSE, P. R. **A textbook of soil chemical analysis**. London, John Murray, 1971. 520 p.

IBÁ – Indústria Brasileira de Produtores de Árvores. **Relatório IBÁ 2016 ano base 2015**. Brasília: 2016. 100 p. Disponível em: <http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2016_.pdf>. Acesso em: 15 maio 2018.

IBÁ – Indústria Brasileira de Produtores de Árvores. **Relatório IBÁ 2017 ano base 2016**. Brasília: 2017. 80 p. Disponível em: <http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2017.pdf>. Acesso em: 15 maio 2018.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual técnico da vegetação brasileira**: sistema fitogeográfico, inventário das formações florestais e campestres, técnicas e manejo de coleções botânicas, procedimentos para mapeamentos. Rio de Janeiro-RJ: IBGE - Diretoria de Geociências (Manuais Técnicos de Geociências, 1) 2012, 271 p.

INOBUSHI, K.; WADA, H.; TAKAI, Y. Easily decomposable organic matter in paddy soil. VI. Kinetics of nitrogen mineralization in submerged soils. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 34, p. 563-572, 1985.

JONES, A. Estimation of an active fraction of soil nitrogen. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 15, p. 23-32, 1984.

JUMA, N. G.; PAUL, E. A.; MARY, B. Kinetic analysis of net mineralization in soil. **Soil Science Society of America Journal**, v. 48, p. 465-472, 1984.

KEENEY, D. R.; BREMNER, J. M. Comparison and evaluation of laboratory methods of obtaining an index of soil nitrogen availability. **Agronomy Journal**, v. 58, n. 5, p. 498-503, 1966.

KRAVE, A. S.; STRAALLEN, N. M.; VERSEVELD, H. W. Potential nitrification and factors influencing nitrification in pine forest and agricultural soils in Central Java, Indonesia. **Pedobiologia**, v. 46, p. 573-594, 2002.

KUHNEN, F. **Mineralização de nitrogênio de solos e de resíduo orgânico em laboratório e em campo**. Jaboticabal-SP: UNESP, 2013, 75 p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista.

LACLAU, J. P.; DELEPORTE, P.; RAHGER, J.; BOUILLET, J. P.; KAZOTTI, G. Nutrient dynamics throughout the rotation of Eucalyptus clonal stands in Congo. **Annals of Botany**, v. 91, p. 879-892, 2003.

LACLAU, J. P.; RAHGER, J.; GONÇALVES, J. L. M.; MAQUÈRE, V.; KRUSCHE, A. V.; M'BOU, A. T.; 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, n. 9, p. 1771-1785, 2010.

LACLAU, J. P.; TUTAIN, F.; M'BOU, A. T.; ARNAUD, M.; JOFRE, R.; RANGER, J. The function of the superficial root mat in the biogeochemical cycles of nutrients in Congolese *Eucalyptus* plantations. **Annals of Botany**, v. 93, p. 249-261, 2004.

LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Carlos: RiMa, 2004. 531 p.

LELES, P. S. S.; REIS, G. G.; REIS, M. G. F.; MORAIS, E. J. Crescimento, produção e alocação de matéria seca de *Eucalyptus camaldulensis* e *E. pellita* sob diferentes espaçamentos na região de Cerrado, MG. **Scientia Forestalis**, n. 59, p. 77-87, 2001.

LI, H.; HAN, Y.; CAI, Z. Nitrogen mineralization in paddy soils of the Taihu Region of China under anaerobic conditions: dynamics and model fitting. **Geoderma**, v. 115, p. 161-175, 2003.

LUCE, M. S.; WHALEN, J. K.; ZIADI, N.; ZEBARTH, B. J. Nitrogen Dynamics and Indices to Predict Soil Nitrogen Supply in Humid Temperate Soils. **Advances in Agronomy**, v. 112, p. 55-102, 2011.

MANTOVANI, J. R.; FERREIRA, M. E.; CRUZ, M. C. P.; BARBOSA, J. C.; FERREIRA, A. C. Mineralização de carbono e de nitrogênio provenientes de composto de lixo urbano em Argissolo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, p. 677-684, 2006.

MARCHETTI, R.; LAZERRI, L.; D'AVINO, L.; PONZONI, G. Nitrogen and carbono mineralization in soils amended with biofumigant or non-biofumigant plant materials. **Industrial Crops and Products**, v. 75, p. 65-72, 2015.

MARION, G. M.; KUMMEROW, J.; MILLER, P. C. Predicting nitrogen mineralization in chaparral soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 45, p. 956-961, 1981.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plant**. 2. ed. New York: Academic Press, 1995. 889 p.

MILLER, H. G. Forest fertilization: some guiding concepts. **Forestry**, v. 54, n. 2, p. 157-167, 1981.

MOLINA, J. A. E.; CLAPP, C. E.; LARSON, W. E. Potentially mineralizable nitrogen in soil: the simple exponential model does not apply for the first 12 weeks of incubation. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, p. 442-443, 1980.

MORA, A. L.; GARCIA, C. H. **A cultura do eucalipto no Brasil**. São Paulo, Sociedade Brasileira de Silvicultura, 2000. 112 p.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. Lavras, UFLA, 2002. 626 p.

NUNES, D. A. D.; GAMA-RODRIGUES, E. F.; BARRETO, P. A. B.; GAMA-

RODRIGUES, A. C.; MONROE, P. H. M. Carbon and nitrogen mineralization in soil of leguminous trees in a degraded pasture in northern Rio de Janeiro, Brazil. **Journal of Forestry Research**, v. 27, p. 91-99, 2015.

PAUL, E. A.; CLARK, F. E. Closing the nitrogen cycle: return of nitrogen to the soil. In: PAUL, E. A.; CLARK, F. E. **Soil microbiology and biochemistry**. 2. ed. San Diego, Academic Press, 1996. p. 215-244.

PAUL, E. A.; JUMA, N. G. Mineralization and immobilization of soil nitrogen by microorganisms. In: CLARK, F. E.; ROSSWA, T. (Eds.). **Terrestrial Nitrogen Cycles: processes, ecosystem strategies and management impacts**. Stockholm, Swedish Natural Science Research Council (Ecological Bulletins, 33), 1981, 16 p.

PINTO JÚNIOR, J. E.; SANTAROSA, E.; GOULART, I. C. G. R. Histórico do cultivo de eucalipto. In: SANTAROSA, E.; PENTEADO JÚNIOR, J. F.; GOULART, I. C. G. R. **Transferência de tecnologia florestal: cultivo de eucalipto em propriedades rurais: diversificação da produção e renda**. Brasília, Embrapa, 2014. 138 p.

POGGIANI, F.; COUTO, H. T. Z.; 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*. **Scientia Forestalis**, n. 25, p. 37-39, 1983.

POTTKER, D.; TEDESCO, M. J. Efeito do tipo e tempo de incubação sobre a mineralização da matéria orgânica e nitrogênio total em solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 3, p. 20-24, 1979.

PULITO, A. P. **Resposta à fertilização nitrogenada e estoque de nitrogênio biodisponível em solos usados para plantações de *Eucalyptus***. Piracicaba-SP: USP, 2009, 59 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Universidade de São Paulo.

PULROLNIK, K.; BARROS, N. F.; SILVA, I. R.; NOVAIS, R. F.; BRANDANI, C. B. Estoques de carbono e nitrogênio em frações lábeis e estáveis da matéria orgânica de solos sob eucalipto, pastagem e Cerrado no Vale do Jequitinhonha – MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 1125-1136, 2009.

REIS, M. G. F.; BARROS, N. F.; KIMMINS, J. P. Acúmulo de nutrientes em uma sequência de idade de *Eucalyptus grandis* W. Hill (ex- maiden) plantado no Cerrado em duas áreas com diferentes produtividades, em Minas Gerais. **Revista Árvore**, v. 11, p. 1-15, 1987.

REZENDE, C. P.; CANTARUTTI, R. B.; BRAGA, J. M.; GOMIDE, J. A.; PEREIRA, J. M.; FERREIRA, E.; TARRÉ, R.; MACEDO, R.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; CADISCH, G.; GILLER, K. E.; BODDEY, R. M. Litter deposition and disappearance in *Brachiaria* pastures in the Atlantic forest region of the South of Bahia, Brazil. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 54, p. 99-112, 1999.

ROY, S.; SINGH, J. S. Seasonal and spatial dynamics of plant-available N and P pools and N-mineralization in relation to fine roots in a dry Tropical Forest habitat. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 27, n. 1, p. 33-40, 1995.

SAINJU, U. M.; LENNSEN, A. W.; CAESAR-TONTHAT, T.; JABRO, J. D.; LARTEY, T.; EVANS, R. G.; ALLEN, B. L. Dryland soil nitrogen cycling influenced by tillage, crop rotation, and cultural practice. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 93, p. 309-322, 2012.

SANQUETTA, C. R.; CORTE, A. P. D.; BALBINOT, R.; ZILLIOTTO, M. A. B. Proposta metodológica para quantificação e monitoramento do carbono estocado em florestas plantadas. In: SANQUETTA, C. R.; ZILLIOTTO, M. A. B. **Carbono: ciência e mercado global**. Curitiba, UFPR/ECOPLAN, 2004. p. 120-150.

SANTANA, R. C.; BARROS, N. F.; NEVES, J. C. L. Biomassa e conteúdo de nutrientes de procedências de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna* em alguns sítios florestais do Estado de São Paulo. **Scientia Forestalis**, n. 56, p. 155-169, 1999.

SANTANA, R. C.; BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F.; LEITE, H. G.; COMERFOR, N. B. Alocação de nutrientes em plantios de eucalipto no Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 2723-2733, 2008.

SANTOS NETO, A. P.; BARRETO, P. A. B.; GAMA-RODRIGUES, E. F.; NOVAES, A. B.; PAULA, A. Produção de serapilheira em Floresta Estacional Semidecidual e em plantios de *Pterogyne nitens* Tul. e *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake no Sudoeste da Bahia. **Ciência Florestal**, v. 25, n. 3, p. 633-643, 2015.

SANTOS, R. C. **Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto**. Lavras-MG: UFLA, 2010, 173 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras.

STANFORD, G.; SMITH, S. J. Nitrogen mineralization potentials of soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 36, p. 465-472, 1972.

VIERA, M.; SCHUMACHER, M. V.; TRÜBY, P.; ARAÚJ, E. F. Implicações nutricionais com base em diferentes intensidades de colheita da biomassa de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus globulus*. **Ciência Rural**, v. 45, p. 432-439, 2015.

VILA, E. B.; PEREIRA, M. G.; ALONSO, J. M.; BEUTLER, S. J.; LELES, P. S. S. Aporte de serapilheira e nutrientes em área de restauração florestal com diferentes espaçamentos de plantio. **Floresta e Ambiente**, v. 23, n. 1, p. 90-99, 2016.

VILELA, D. M.; PROCTOR, J. Mineralização de nitrogênio e nitrificação em solos de uma floresta monodominante na Amazônia, Ilha de Maracá, RR, Brasil. **Geochimica Brasiliensis**, v. 10, n. 2, p. 335-345, 1996.

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 Soil**, v. 3, p. 99-111, 2012.

WHIETHOLTER, S. Nitrogênio no solo sob plantio direto. **Plantio Direto e Tecnologia Agrícola**, v. 58, p. 38-42, 2000.

YAGI, R.; FERREIRA, M. E.; CRUZ, M. C. P.; BARBOSA, J. C. Mineralização potencial e líquida de nitrogênio em solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 385-394, 2009.