

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP**

**CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**CARBONO LÁBIL E NITROGÊNIO MINERALIZÁVEL POR  
INCUBAÇÃO ANAERÓBIA EM ÁREA DE PRODUÇÃO DE  
MILHO VARIANDO PLANTAS DE COBERTURA E DOSES  
DE NITROGÊNIO**

**Natã Rodrigues Costa**

**Engenheiro Agrônomo**

**2020**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP**

**CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**CARBONO LÁBIL E NITROGÊNIO MINERALIZÁVEL POR  
INCUBAÇÃO ANAERÓBIA EM ÁREA DE PRODUÇÃO DE  
MILHO VARIANDO PLANTAS DE COBERTURA E DOSES  
DE NITROGÊNIO**

**Natã Rodrigues Costa**

**Orientadora: Profa. Dra. Mara Cristina Pessôa da Cruz**

**Dissertação apresentada à Faculdade de  
Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp,  
Câmpus de Jaboticabal, como parte das  
exigências para a obtenção do título de  
Mestre em Agronomia (Ciência do Solo)**

**2020**

C837c Costa, Natã Rodrigues

Carbono lábil e nitrogênio mineralizável por incubação anaeróbia em área de produção de milho variando plantas de cobertura e doses de nitrogênio / Natã Rodrigues Costa. -- Jaboticabal, 2021

35 p. : il., tabs.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal

Orientadora: Mara Cristina Pessôa da Cruz

1. Fertilidade do Solo. 2. Matéria orgânica do solo. 3. Carbono orgânico lábil. 4. Nitrogênio orgânico lábil. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: CARBONO LÁBIL E NITROGÊNIO MINERALIZÁVEL POR INCUBAÇÃO ANAERÓBIA EM ÁREA DE PRODUÇÃO DE MILHO VARIANDO PLANTAS DE COBERTURA E DOSES DE NITROGÊNIO

**AUTOR: NATÃ RODRIGUES COSTA**

**ORIENTADORA: MARA CRISTINA PESSÔA DA CRUZ**

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em AGRONOMIA (CIÊNCIA DO SOLO), pela Comissão Examinadora:



Profa. Dra. MARA CRISTINA PESSOA DA CRUZ (Participação Virtual)  
Departamento de Ciências da Produção Agrícola (Solos e Adubos) / FCAV / UNESP - Jaboticabal



Prof. Dr. JOSÉ RICARDO MANTOVANI (Participação Virtual)  
Fundação de Ensino e Tecnologia de Alfenas-FETA / Faculdade de Agronomia da Universidade José do Rosário Vellano-Unifenas - Alfenas/MG



Prof. Dr. MANOEL EVARISTO FERREIRA (Participação Virtual)  
Departamento de Ciências da Produção Agrícola (Solos e Adubos) / FCAV / UNESP - Jaboticabal

Jaboticabal, 14 de dezembro de 2020

## **DADOS CURRICULARES DO AUTOR**

Natã Rodrigues Costa, nasceu em Ribeirão Preto, SP, em 04 de maio de 1995. Ingressou no curso de Engenharia Agrônômica no ano de 2013, pela Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, campus de Jaboticabal, SP, com conclusão no ano de 2017. Durante a graduação, estagiou em experimento de avaliação do crescimento e desenvolvimento de *Brachiaria brizantha* fertirrigada com efluente de estação de tratamento de esgoto, e na produção e instalação de extratores de solução do solo. No ano de 2018 ingressou no curso de mestrado acadêmico em Agronomia (Ciência do Solo), pela mesma instituição, com ênfase em fertilidade do solo.

“Os céus proclamam a glória de Deus, e o firmamento anuncia as obras das suas mãos”

*Salmos 19:1*

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus, pela vida, saúde, oportunidade de aprender e consolo em todos os momentos.

À minha família, pelo apoio em todos os momentos, pelos incentivos, conselhos e afeto.

Aos amigos que contribuíram direta e indiretamente para a conclusão desta etapa.

À instituição Unesp/FCAV que nos proporcionou esta oportunidade.

À CAPES, pela concessão da bolsa de mestrado que permitiu a realização do curso.

À Profa. Dra. Mara Cristina Pessôa da Cruz, que prontamente nos atendeu, transmitindo conhecimento e orientação durante este curso.

Ao Prof. Dr. Manoel Evaristo Ferreira pelos conselhos e instruções que contribuíram para a execução do trabalho.

Ao Prof. Itamar Andrioli, por ter permitido o uso da área experimental, para que pudéssemos realizar o trabalho.

Aos colegas do Laboratório de Fertilidade do Solo, pelo auxílio e companheirismo.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

## SUMÁRIO

	Página
RESUMO .....	ii
ABSTRACT .....	iii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA .....	3
2.1. Carbono orgânico lábil.....	3
2.2. Nitrogênio orgânico mineralizável por incubação anaeróbica de curta duração .....	6
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	8
3.1. Descrição geral do experimento.....	8
3.2. Amostragem de solo e plantas e avaliações na safra 2018/2019 .....	10
3.3. Tratamento estatístico dos dados.....	13
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	13
4.1. Nitrogênio acumulado, concentração de nitrogênio e massa seca da parte aérea das plantas de milho.....	13
4.2. Carbono orgânico lábil.....	19
4.3. Nitrogênio orgânico mineralizável.....	24
5. CONCLUSÕES.....	30
6. REFERÊNCIAS .....	31

## CARBONO LÁBIL E NITROGÊNIO MINERALIZÁVEL POR INCUBAÇÃO ANAERÓBIA EM ÁREA DE PRODUÇÃO DE MILHO VARIANDO PLANTAS DE COBERTURA E DOSES DE NITROGÊNIO

**RESUMO** – O manejo do solo com o uso de plantas de cobertura pode favorecer a fertilidade do solo e proporcionar sistemas de produção mais sustentáveis. O objetivo com este trabalho foi avaliar os efeitos do cultivo de plantas de cobertura em pré-safra de milho e de doses de nitrogênio em cobertura na cultura do milho, em experimento de longa duração (dezoito anos): (i) na qualidade do solo por meio da medida do carbono lábil; (ii) no potencial de fornecimento de N do solo para o milho, determinando o carbono orgânico lábil e o N orgânico mineralizável por incubação anaeróbia de curta duração. O delineamento experimental é em blocos casualizados com parcelas subdivididas (“split-plots”), com quatro repetições. Nas parcelas são cultivadas as plantas de cobertura mucuna-cinza (*Mucuna cinerea*), feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis*) e milheto (*Pennisetum americanum*), mais um tratamento controle (pousio). Nas subparcelas são aplicadas doses de N (0, 60, 120 e 180 kg ha<sup>-1</sup>) em cobertura na cultura do milho. Na safra 2018/2019 foram coletadas amostras de solo das profundidades de 0-5, 5-10 e 10-20 cm para avaliar o carbono lábil, oxidável em permanganato de potássio, e o nitrogênio orgânico mineralizável por incubação anaeróbia. Na parte aérea das plantas de milho foi avaliado o acúmulo de N. Na camada de 0-5 cm, o teor de carbono lábil foi menor, 557 mg kg<sup>-1</sup> quando a maior dose de N foi aplicada. Em contraposição, o maior valor, 615 mg kg<sup>-1</sup>, foi obtido quando o N em cobertura deixou de ser aplicado. Ainda nesta camada, o cultivo de plantas de cobertura proporcionou aumentos de 38%, 29% e 19% no N orgânico mineralizável, considerando feijão-de-porco, milheto e mucuna-cinza, respectivamente. Na camada de 5-10 cm, o solo cultivado com mucuna-cinza foi o que apresentou maiores teores de carbono lábil, exceto quando a dose de 120 kg ha<sup>-1</sup> de N foi utilizada. Nas camadas de 5-10 e 10-20 cm, a dose de 60 kg ha<sup>-1</sup> de N foi a que resultou em maior teor de N orgânico mineralizável. A aplicação de 180 kg ha<sup>-1</sup> de N levou aos menores teores de carbono orgânico lábil nas camadas de 5-10 e 10-20 cm de profundidade, quando o milho foi cultivado após o pousio. Contudo, proporcionou maior teor na camada de 10-20 cm quando o milho foi cultivado após as leguminosas mucuna-cinza e feijão-de-porco, demonstrando que o carbono lábil responde de forma diferente à adubação nitrogenada nesta camada, dependendo do tipo de resíduo. O N mineralizado do solo por incubação anaeróbia não se correlacionou com o N acumulado pelas plantas de milho, demonstrando que neste estudo, esta variável não explicou o fornecimento de N do solo para o milho.

**Palavras-chave:** matéria orgânica do solo, carbono oxidável, nitrogênio disponível, gramínea, leguminosa.

## LABILE CARBON AND MINERALIZABLE NITROGEN BY ANAEROBIC INCUBATION IN MAIZE PRODUCTION AREA VARYING NITROGEN RATES AND COVER CROPS

**ABSTRACT** – Soil management using cover crops can favor soil fertility and provide more sustainable production systems. The objective with this research was to evaluate the effects of the cultivation of cover crops before sowing corn and nitrogen doses in the corn culture, in a long-term experiment (eighteen years): (i) in the soil quality by measuring labile carbon; (ii) in the soil potential for supplying N to corn, determining the labile carbon and the mineralizable organic N by short-term anaerobic incubation. The experimental design is in randomized blocks with split-plots, with four replications. In the plots, the gray velvet bean (*Mucuna cinerea*), jack bean (*Canavalia ensiformis*) and pearl millet (*Pennisetum americanum*) are grown, plus a control treatment (fallow). In the subplots, doses of N (0, 60, 120 and 180 kg ha<sup>-1</sup>) are applied in sidedress in the corn crop. In the 2018/2019 harvest, soil samples were collected from depths of 0-5, 5-10 and 10-20 cm to evaluate the labile oxidizable carbon in potassium permanganate and mineralizable organic nitrogen by anaerobic incubation. The aerial part of the corn plants was also collected to evaluate the supply of N by the cover plants. In the 0-5 cm layer, the labile carbon content was lower, 557 mg kg<sup>-1</sup>, when the highest dose of N was applied. In contrast, the highest value, 615 mg kg<sup>-1</sup>, was obtained when the N in sidedress was not applied. Also in this layer, the cultivation of cover crops provided an increase of 38%, 29% and 19% in the content of mineralizable organic N, considering jack bean, pearl millet and gray velvet bean, respectively. In the 5-10 cm layer, the soil cultivated with gray velvet bean was the one with the highest labile carbon content, except when the dose of 120 kg ha<sup>-1</sup> of N was used. In the 5-10 and 10-20 cm layers, the dose of 60 kg ha<sup>-1</sup> of N provided the highest content of mineralizable organic N. The application of 180 kg ha<sup>-1</sup> of N, provided a lower content of labile organic carbon in the layers of 5-10 and 10-20 cm deep, when the corn was grown after fallow. However, it provided a higher content in 10-20 cm layer when the corn was grown after gray velvet bean and jack bean, demonstrating that labile carbon responds differently to N fertilization in this layer, depending on the type of residue. Mineralizable organic N evaluated by anaerobic incubation did not correlate with the N accumulated by corn plants, demonstrating that in this study, this variable did not explain the N supply from the soil to corn.

**Keywords:** soil organic matter, oxidizable carbon, available nitrogen, grasses, legumes.

## 1. INTRODUÇÃO

Um dos principais indicadores de qualidade do solo é a matéria orgânica do solo (MOS), composta por aproximadamente 58% de carbono (C). A MOS exerce funções como aumento da capacidade de troca de cátions (CTC) e da disponibilidade de nutrientes, melhora da estrutura e aumento da capacidade de armazenamento de água no solo.

Considerando a resistência à decomposição, de modo geral a MOS é dividida em lábil e recalcitrante. A fração lábil contém substâncias de fácil decomposição, que têm tempo de permanência curto no solo e são sensíveis a mudanças no uso e manejo do solo em curto prazo. A fração recalcitrante é a maior parte da MOS e contém substâncias resistentes à decomposição, que permanecem no solo por longos períodos, e respondem lentamente a mudanças no manejo do solo.

A fração lábil, além de ser sensível a mudanças no uso do solo, é fonte de nutrientes para as plantas, e de energia e nutrientes para os microrganismos. Nas últimas décadas, esta fração ganhou destaque porque é considerada um indicador de qualidade do solo. Ela pode ser estimada por meio de diversos métodos, com o objetivo de avaliar os impactos de sistemas de preparo do solo, adubação orgânica e mineral, rotações de culturas e uso de plantas de cobertura na qualidade do solo.

A MOS é o principal reservatório do nitrogênio (N) do solo, conseqüentemente, alterações no estoque da MOS refletem nas quantidades totais e disponíveis de N. De modo geral, boa parte do N absorvido pelas plantas é proveniente da mineralização do N orgânico presente na MOS. Neste processo, a fração lábil da MOS representa uma fonte potencial de N, devido à sua maior facilidade de sofrer mineralização, ou seja, de ser decomposta por oxidação enzimática pelos microrganismos. Desta forma, C e N orgânicos estão intimamente ligados, e o conhecimento da dinâmica de ambos em função de práticas agrícolas pode ajudar na seleção e adoção destas práticas.

Uma das práticas agrícolas que pode proporcionar ganho de qualidade do solo é o cultivo de plantas de cobertura. De modo geral, o cultivo das espécies de cobertura leva ao acúmulo de C e N no solo. A quantidade de fitomassa produzida pelas plantas de cobertura, e sua qualidade, definida pelas concentrações de N, celulose, hemicelulose, lignina e polifenóis, e ainda pelas relações C/N, lignina/N, (lignina +

polifenóis)/N, interferem nos processos de acúmulo de C e N. A quantidade de C adicionada ao solo via fitomassa tem grande participação no processo de acúmulo, e a qualidade dos resíduos interfere na taxa de conversão do C adicionado em MOS. Resíduos com baixa concentração de N e alto conteúdo de lignina apresentam baixa taxa de decomposição, o que pode favorecer o acúmulo.

Outra prática agrícola que exerce influência no estoque de C e na fração lábil é a adubação nitrogenada. O N é, de modo geral, o nutriente mais requerido pelas culturas e o que frequentemente mais limita seus rendimentos. Desta forma, tem sido amplamente utilizado na busca por altas produtividades, principalmente na cultura do milho, que é altamente responsiva a adubação nitrogenada. Este aumento de produtividade aumenta a quantidade de C adicionada ao solo via restos culturais. As culturas sucessoras podem se beneficiar do efeito residual da adubação nitrogenada e fixar maior quantidade de C, deixando parte no solo, o que leva, em longo prazo, ao aumento do estoque de C no solo. Por outro lado, a adubação nitrogenada associada a resíduos ricos em energia e de fácil decomposição aumenta a taxa de decomposição e/ou promove a mineralização do C orgânico do solo. Este efeito em sistemas de produção com baixa entrada de C pode levar à diminuição do estoque de C.

Uma alternativa que pode favorecer a manutenção ou o aumento do estoque de C no solo em sistemas de produção agrícola é o uso combinado de plantas de cobertura com fertilizante nitrogenado. A combinação destas práticas aumenta a quantidade de C adicionada ao solo e favorece o acúmulo, mais do que cada prática isoladamente. Além disso, o cultivo de leguminosas como plantas de cobertura fornece N para as culturas em sucessão, reduzindo a quantidade de N aplicada via fertilizante nitrogenado.

Desta forma, as hipóteses deste trabalho foram: o cultivo de plantas de cobertura e a adubação nitrogenada aumentam o carbono orgânico lábil do solo e a reserva de nitrogênio orgânico mineralizável; a medida do carbono orgânico oxidável empregando solução de permanganato de potássio correlaciona-se com a medida do nitrogênio mineralizável por incubação anaeróbia e ambas as variáveis explicam o nitrogênio absorvido pelo milho quando plantas de cobertura são cultivadas em pré-safra.

Os objetivos com este trabalho foram avaliar os efeitos do cultivo de espécies de plantas de cobertura em pré-safra de milho e de doses de nitrogênio em cobertura na cultura do milho: (i) na qualidade do solo avaliada por meio da medida do carbono lábil; (ii) no potencial de fornecimento de N do solo para o milho, medindo o carbono lábil e o N orgânico mineralizável por incubação anaeróbica de curta duração.

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1. Carbono orgânico lábil**

Para o estudo da matéria orgânica do solo diferenciam-se três frações: lábil, estável e inerte. A fração lábil é a que apresenta o menor tempo de meia-vida, variando de dias a poucos anos, enquanto para a fração estável este tempo varia de anos a décadas e, para a fração inerte, de décadas a séculos (Strosser, 2010). A soma do carbono presente nas três frações resulta no carbono orgânico total do solo (COS), mas este atributo responde muito lentamente a mudanças no manejo e uso do solo, devido ao predomínio de C em formas humificadas ou recalcitrantes. Porém, pequenas alterações, muitas vezes difíceis de medir, podem exercer efeito pronunciado no comportamento e nos processos biológicos do solo (Weil et al., 2003).

Nas últimas décadas as atenções têm se voltado para as frações mais lábeis do carbono do solo, por serem mais sensíveis a mudanças no manejo, incluindo sistema de cultivo, adubação orgânica e mineral e rotação de culturas (Heitkamp et al., 2009).

A fração lábil representa uma pequena fração do COS (Lucas, 2004), e é constituída de resíduos de plantas, de microrganismos e da fauna do solo em diferentes graus de degradação e seus produtos de decomposição, ou seja, substâncias não húmicas facilmente decomponíveis como carboidratos, incluindo polissacarídeos, proteínas, ácidos orgânicos, aminoácidos e outros compostos não específicos (Poirier et al., 2005). Ainda, é a fração que está diretamente disponível para a atividade microbiana, e, desta forma, é considerada uma fonte primária de energia para os microrganismos. Sua decomposição controla a liberação dos nutrientes que contém e é dependente de umidade, temperatura, porosidade e pH do

solo, que podem atuar inibindo ou favorecendo o processo. Além de atributos do solo, a decomposição é controlada pela estrutura química e composição das substâncias, que determinam a sua disponibilidade para os microrganismos (Capriel, 1997).

Um amplo espectro de métodos analíticos tem sido usado para determinar e/ou avaliar a fração lábil, baseados em princípios físicos, químicos e bioquímicos, cujo principal objetivo é compreender o propósito e as funções desta fração no solo como um todo. A determinação da fração lábil é principalmente usada para: a) avaliar a qualidade da matéria orgânica do solo; b) avaliar a eficiência da agricultura sustentável; c) comparar diferentes manejos do solo ou tratamentos; d) compreender os processos de decomposição e os fluxos de energia e nutrientes relacionados, e e) efetuar medidas do sequestro de carbono no solo (Strosser, 2010). Além destes usos, a fração lábil também serve como indicador da ciclagem de nutrientes, da formação de agregados no solo, e como habitat para a biodiversidade (Bongiorno et al., 2019).

Uma das formas de quantificar o carbono orgânico lábil é através da oxidação com permanganato de potássio ( $\text{KMnO}_4$ ). O método envolve a oxidação do carbono lábil pela exposição à uma concentração conhecida de  $\text{KMnO}_4$ . Após a reação de oxidação com o carbono, a concentração de  $\text{KMnO}_4$  diminui, sendo subsequentemente medida por colorimetria, em espectrofotômetro (Blair et al., 1995; Weil et al., 2003; Lucas, 2004).

Em condições alcalinas, o permanganato de potássio é um poderoso agente oxidante, devido ao alto potencial negativo entre os íons  $\text{MnO}_4^-$  e  $\text{Mn}^{2+}$  (Cotton e Wilkinson, 1965 – citados por Lucas, 2004), e é conhecido por oxidar carboidratos simples, aminoácidos e aminoaçúcares, compostos de C contendo hidroxilas, cetonas, carboxilas, duplas ligações e compostos alifáticos (Loginow et al., 1987; Stanford, 1978; Skoog e West, 1969 – citados por Lucas, 2004).

O uso do permanganato de potássio para estimar o C orgânico do solo não é uma prática tão recente, como observado em Puri e Sarup (1937), que relatam métodos para estimar o C orgânico do solo pela oxidação com este reagente. No entanto, o uso desta substância para quantificar o carbono lábil ganhou destaque a partir da década de 1990, com os estudos de Lefroy et al. (1993) e Blair et al. (1995).

Blair et al. (1995) usaram a concentração de  $0,333 \text{ mol L}^{-1}$  de  $\text{KMnO}_4$ , atribuindo ao carbono oxidado por esta solução a designação lábil, e ao que não foi oxidado a

denominação não lábil. Neste estudo, os autores compararam solos cultivados com solos de áreas adjacentes que não foram cultivadas (referência), e verificaram que a fração do carbono oxidada pelo  $\text{KMnO}_4$  diminuiu significativamente em comparação à fração não oxidada e ao carbono orgânico total do solo. O carbono oxidado foi também mais sensível ao uso de práticas como rotação de culturas e presença ou ausência de palha de cana-de-açúcar sobre o solo, do que a fração não oxidada e o carbono orgânico total.

Weil et al. (2003) adaptaram o método de Blair et al. (1995), usando a concentração de  $0,02 \text{ mol L}^{-1}$  de  $\text{KMnO}_4$ . Os autores avaliaram a sensibilidade da fração de C oxidada à sistemas de preparo do solo, comparando preparo convencional com plantio direto. O C oxidado pelo permanganato foi significativamente maior sob plantio direto, enquanto o COS não apresentou diferença significativa entre os sistemas de preparo do solo. Além disso, o C oxidado apresentou correlação com propriedades biológicas do solo como respiração basal e C da biomassa microbiana.

Culman et al. (2012) compararam o carbono lábil oxidado por permanganato (COXP) com dois outros indicadores, o carbono orgânico particulado (COP) e o carbono da biomassa microbiana (CBM), que são reconhecidos pela sensibilidade à mudança de manejo no solo, ciclagem e disponibilidade de nutrientes, agregação do solo e acúmulo de carbono no solo. Os autores utilizaram 1.379 amostras de solo de 53 locais, abrangendo vários tipos de solo, ecossistemas e áreas geográficas através dos Estados Unidos. Como resultado eles observaram que o COXP se relacionou significativamente com o COP e o CBM, e foi sensível a fatores experimentais como adubação e rotação de culturas.

Em sistema de produção de silagem de milho, Wang et al. (2017) utilizaram o carbono oxidável em permanganato para comparar o efeito da utilização de nabo-forageiro (*Raphanus sativus* L.) como planta de cobertura cultivada no outono/inverno, com o solo deixado em pousio. Os autores observaram que o teor de carbono lábil foi maior, na camada superficial de 0-15 cm e em profundidade (90-105 cm), quando o nabo-forageiro foi cultivado. Ainda, observaram que quando foi feita adubação nitrogenada em cobertura no milho, o teor do carbono lábil foi maior na sucessão nabo-forageiro/milho do que na sucessão pousio/milho, na profundidade de 0-30 cm. Os autores atribuíram este resultado a maior biomassa de parte aérea e

de raízes e maior quantidade de exsudatos radiculares do nabo-forrageiro, em comparação com a vegetação espontânea no pousio.

Bongiorno et al. (2019) avaliaram métodos para quantificar o C lábil em duas situações de manejo agrícola (sistemas de preparo reduzido e convencional, e alta e baixa entrada de material orgânico no solo). Os autores observaram que o preparo reduzido e os locais com alta entrada de material orgânico resultaram em maior C lábil. Contudo, o COXP e o COP foram os métodos mais sensíveis aos fatores de manejo. Além disso, o COXP foi o método mais correlacionado com indicadores de qualidade do solo como carbono orgânico total, nitrogênio total, capacidade de troca de cátions, agregados estáveis em água, capacidade de armazenamento de água, densidade, carbono e nitrogênio da biomassa microbiana e respiração do solo.

## **2.2. Nitrogênio orgânico mineralizável por incubação anaeróbica de curta duração**

A mineralização do N orgânico estocado na matéria orgânica do solo é um processo importante para o agroecossistema, frequentemente fornecendo a maior parte do N absorvido pelas culturas (Gardner e Drinkwater, 2009; Osterholz et al., 2017).

Existem vários métodos químicos e biológicos para estimar o nitrogênio orgânico mineralizável ou um índice de disponibilidade de nitrogênio para as plantas. No conjunto, os métodos de medida do nitrogênio mineral do solo após incubação em condições que promovem a mineralização de N pelos microrganismos em meio aeróbio (Stanford e Smith, 1972) ou anaeróbio (Waring e Bremner, 1964; Keeney e Bremner, 1966) são considerados como padrões (Clark et al., 2019). O método de incubação aeróbica é de longa duração e é considerado como o método de referência, com o qual os outros são comparados (Clark et al., 2019).

O método de incubação anaeróbica, por sua vez, é de curta duração, de modo geral se correlaciona positivamente com o método de incubação aeróbia (Yagi, 2008), e apresenta como vantagens a rapidez e a precisão; a aplicabilidade para solo seco ao ar ou para amostras úmidas; a facilidade de execução por não requerer o uso de aditivos ou análises preliminares para determinar a quantidade de água requerida para

a incubação e por se apoiar apenas na determinação de N-amônio; a necessidade de apenas uma pequena amostra de solo; e a não exigência da extração do amônio preexistente na amostra (Waring e Bremner, 1964).

O nitrogênio orgânico mineralizável é obtido a partir da mineralização das frações lábeis do N total do solo, ou seja, substâncias de carbono que contém N e são de fácil decomposição (Maia e Cantarutti, 2004). Desta forma, existe uma relação estreita entre o carbono lábil e o nitrogênio orgânico mineralizável, de modo que práticas de manejo que aumentem o carbono lábil, também aumentam o N orgânico mineralizável (Spargo et al., 2011).

O nitrogênio inorgânico obtido com os métodos de incubação refere-se à quantidade líquida de N, pois não considera o consumo e as perdas por desnitrificação, volatilização e imobilização (Yagi, 2008; Osterholz et al., 2017). Desta forma, estima o N prontamente disponível para as plantas, fato que pode ser observado através da alta correlação do N mineralizado por incubação anaeróbia com o N absorvido pelas culturas (Spargo et al., 2011; Pires et al., 2015).

Uma das práticas que contribuem para a manutenção ou o aumento do N orgânico mineralizável é o aumento da diversidade de culturas numa mesma área, sejam culturas comerciais ou plantas de cobertura cultivadas na entressafra. As plantas de cobertura podem produzir grande quantidade de resíduos de parte aérea e raízes, reduzir a erosão, reciclar nutrientes e fixar N atmosférico (Mahal et al., 2018). Moore et al. (2014) verificaram que o cultivo de centeio, usado como planta de cobertura, após soja e após milho para silagem, aumentou o nitrogênio orgânico mineralizável em 38%, em comparação com o cultivo da sucessão soja-milho apenas.

O uso de espécies da família das fabáceas, conhecidas por fixar N<sub>2</sub> atmosférico através da fixação biológica, apresenta potencial de aumentar o N orgânico mineralizável (Mahal et al., 2018). Estas espécies podem liberar, em média, 16% do N total assimilado, na forma de exsudatos radiculares (Wichern et al., 2008). Além disto, a decomposição dos seus resíduos libera N no solo, e como parte deste N irá integrar as frações lábeis da matéria orgânica, será mineralizada em curto prazo. A outra parte irá integrar a fração recalcitrante da matéria orgânica, cuja mineralização ocorre em longo prazo (Terçariol, 2020).

Espécies como as mucunas e o feijão-de-porco podem fixar até 157 e 190 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> de nitrogênio (Wutke et al., 2014). Desta forma, essas espécies podem representar uma fonte de N para culturas subsequentes como o milho. Em trabalho realizado na região dos cerrados, a produtividade de grãos de milho aumentou 22% quando cultivado em sucessão ao feijão-de-porco, comparado com o cultivo em sucessão ao pousio (Santos et al., 2019). O uso de mucuna em sucessão com o milho, após oito anos de cultivos, proporcionou 1,27 Mg ha<sup>-1</sup> de N a mais no solo do que o sistema milho cultivado após pousio, na camada de 0-20 cm (Amado et al., 2001).

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1. Descrição geral do experimento

O experimento foi instalado na Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV/Unesp), campus de Jaboticabal-SP, na safra 2000/2001, a 21°15'22" de latitude Sul, 48°16'43" de longitude Oeste e altitude de 595 metros. O clima do local, segundo a classificação de Köppen-Geiger, é Aw, tropical de savana com inverno seco. A precipitação e a temperatura média mensais durante o período do experimento (maio/2018 a maio/2019), estão apresentadas na Figura 1.

O solo do local do experimento é Latossolo Vermelho distrófico típico de textura argilosa (Andrioli e Centurion, 1999). A caracterização química do solo antes da instalação do experimento está na Tabela 1. Os métodos de análise química utilizados estão descritos em Raij et al. (2001) e a análise granulométrica foi feita segundo Camargo et al. (2009).

Tabela 1. Atributos químicos e granulometria do solo na área do experimento no ano de 2000.

Prof. Cm	P-resina mg dm <sup>-3</sup>	COT <sup>1</sup> g kg <sup>-1</sup>	pH CaCl <sub>2</sub>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	H+Al	CTC	V	argila	areia
				----- mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----					%	g kg <sup>-1</sup>	
0-5	32	13	4,5	14	8	4,0	42	68	38	474	499
5-10	35	10	4,4	11	6	3,0	42	62	32	497	481
10-20	58	9	4,3	11	5	2,3	42	60	30	504	467

<sup>1</sup> COT: carbono orgânico total

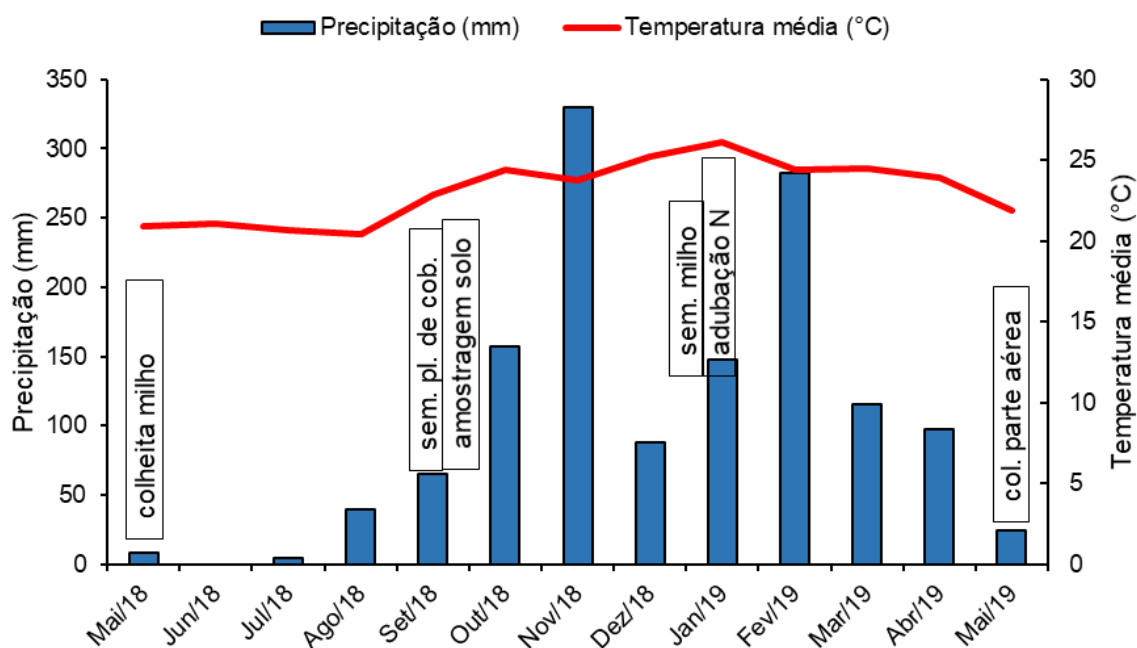


Figura 1. Temperatura média e precipitação pluvial de maio/2018 a maio/2019. Sem. pl. de cob.: semeadura das plantas de cobertura; sem. milho: semeadura do milho; adubação N: adubação nitrogenada de cobertura; e col. parte aérea: coleta da parte aérea das plantas de milho. Dados obtidos da Estação Agroclimatológica UNESP – FCAV.

Até o ano de 1998, a área do experimento era cultivada em sistema de preparo de solo convencional, com milho contínuo. Desde 1998 até o ano das avaliações constantes deste trabalho, a área vem sendo cultivada em sistema de plantio direto. A partir da safra de 2000/2001, iniciou-se o experimento com plantas de cobertura em pré-safra à cultura do milho e doses de nitrogênio em cobertura no milho, no qual as plantas de cobertura são semeadas em setembro ou outubro (dependendo das primeiras chuvas), dessecadas em dezembro ou janeiro e, em seguida, é realizada a semeadura do milho. Entre a colheita do milho e a próxima semeadura das plantas de cobertura, a área é deixada em pousio.

O delineamento experimental é em blocos completos casualizados com parcelas subdivididas e com quatro repetições. Os tratamentos principais, alocados nas parcelas, são constituídos por cinco plantas de cobertura e vegetação espontânea (pousio), sendo as plantas de cobertura: mucuna-cinza (*Mucuna cinerea*), feijão-deporco (*Canavalia ensiformis*), milheto (*Pennisetum americanum*), lablab (*Dolichos lablab*) e crotalária (*Crotalaria juncea*).

Após a dessecação das plantas de cobertura e a semeadura do milho, os tratamentos secundários, alocados nas subparcelas, são constituídos de quatro doses de nitrogênio (N – ureia) em cobertura: 0, 60, 120 e 180 kg ha<sup>-1</sup> de N. Dessa forma, o experimento é constituído de seis tratamentos principais e quatro tratamentos secundários, com quatro repetições, totalizando 96 unidades experimentais.

No presente trabalho foram avaliados os tratamentos principais vegetação espontânea, mucuna-cinza, feijão-de-porco e milho, combinados com as quatro doses de N, e quatro repetições, totalizando 64 unidades experimentais.

O tamanho das parcelas é de 18 m x 7 m (126 m<sup>2</sup>), e das subparcelas 4,5 m x 7 m (31,5 m<sup>2</sup>). Cada subparcela é composta por 5 linhas de plantas de milho, com espaçamento entrelinhas de 0,9 m. Para fins de amostragem na subparcela, as linhas externas das plantas de milho de cada lado da subparcela são consideradas como bordaduras, bem como um metro em cada extremo da subparcela. Assim, as dimensões da área útil da subparcela são de 2,7 m x 5 m (13,5 m<sup>2</sup>).

Na safra 2018/2019, dezoito anos após o início do experimento, as plantas de cobertura foram semeadas em setembro de 2018, sem adubação e com espaçamento de 0,50 m nas entrelinhas. A quantidade de sementes por metro linear foi de 9, 8 e 20 para mucuna-cinza, feijão-de-porco e milho, respectivamente. O milho foi semeado em dezembro, logo após a dessecação das plantas de cobertura, com espaçamento de 0,9 m entrelinhas e população de 55.555 plantas por hectare.

### **3.2. Amostragem de solo e plantas e avaliações na safra 2018/2019**

Entre 25 e 30 dias após a semeadura das plantas de cobertura foram coletadas amostras de solo nas profundidades 0-5, 5-10 e 10-20 cm, com trado holandês, compondo a amostra a partir da coleta e mistura de 20 subamostras por subparcela, dentro da área útil. As amostras foram secas ao ar e, em seguida, passadas em peneira com abertura de malha de 2 mm. Nas amostras foram determinados o carbono lábil e o nitrogênio mineralizável por incubação anaeróbica.

Por ocasião da colheita dos grãos de milho, em 14 de maio de 2019, foram coletadas amostras de parte aérea das plantas de milho, para determinação do nitrogênio total acumulado, coletando as plantas de um metro de linha em cada

subparcela. Os grãos foram separados da parte vegetativa, e esta foi pesada e, em seguida, triturada em picadeira elétrica de forrageiras. Desta amostra triturada foi retirada uma subamostra, que foi lavada em água corrente e com água deionizada sobre peneira. Em seguida, as subamostras foram secas em estufa de circulação forçada de ar à 65-70 °C, até atingir massa constante. Posteriormente, foram moídas em moinho de aço inox do tipo Willey. Os grãos separados da parte vegetativa foram pesados e, em seguida, foi retirada uma subamostra, que foi moída em moedor elétrico de grãos.

Com o objetivo de formar uma única amostra homogênea de grãos e parte vegetativa, foi misturada a subamostra da parte vegetativa com a respectiva subamostra de grãos, respeitando a proporção (em massa) de parte vegetativa para grãos, observada nas plantas.

#### **a) Determinação do carbono orgânico lábil**

O carbono lábil foi determinado por oxidação com permanganato, conforme descrito por Weil et al. (2003), denominado como carbono oxidável em permanganato (COXP). Para a determinação do COXP foram pesados 2,5 g de solo, aos quais foram adicionados 2 mL de solução de permanganato de potássio 0,2 mol L<sup>-1</sup> (preparada em solução de CaCl<sub>2</sub> 1 mol L<sup>-1</sup>, e com pH ajustado para 7,2 usando solução de NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup>) e 18 mL de água deionizada. Em seguida, as amostras foram agitadas por exatamente 2 minutos e, posteriormente, mantidas em repouso por exatamente 10 minutos em ambiente escuro. Após o repouso, retirou-se uma alíquota de 0,5 mL do sobrenadante, que foi transferida para tubo de ensaio, ao qual foram adicionados 19,5 mL de água deionizada. O meio foi homogeneizado em agitador tipo vórtex e, em seguida, foi realizada a leitura da absorbância em espectrofotômetro, com comprimento de onda ajustado para 550 nm.

Foram utilizadas no máximo 10 amostras numa mesma batelada, para que o solo não permanecesse em contato com a solução de permanganato além do tempo recomendado, visto que a reação ocorre enquanto o solo está em contato com a solução.

Uma curva padrão foi feita para cada dia em que houve realização de análise, empregando soluções padrão com as concentrações 0,005, 0,010, 0,015 e 0,020 mol L<sup>-1</sup> de permanganato de potássio.

O COXP foi calculado com base na seguinte equação:

$$\text{COXP} = \frac{[0,02 \text{ mol L}^{-1} - (a + b \times \text{Abs})] \times (9.000 \text{ mg C mol}^{-1}) \times (0,02 \text{ L solução})}{\text{Massa (kg)}}$$

Em que: COXP é carbono oxidável em permanganato (mg kg<sup>-1</sup> solo); 0,02 mol L<sup>-1</sup> é a concentração inicial da solução de permanganato de potássio; *a* é o coeficiente linear ou intercepto da curva padrão; *b* é o coeficiente angular da curva padrão; Abs é a absorvância da amostra; 9.000 mg mol<sup>-1</sup> é a massa assumida de C oxidada por 1 mol de MnO<sub>4</sub><sup>-</sup> (Mn<sup>7+</sup> reduzido a Mn<sup>4+</sup>); e Massa é a massa de solo da amostra em quilogramas.

#### **b) determinação do nitrogênio orgânico mineralizável por incubação anaeróbia de curta duração**

O nitrogênio mineralizável foi determinado por incubação anaeróbica (Nma) segundo o método proposto por Waring e Bremner (1964), com modificação do tempo de incubação de 14 para 7 dias (Keeney e Bremner, 1966). Foram adicionados 5 g de solo a tubo de ensaio (16 x 150 mm) contendo 12,5 mL de água deionizada. Em seguida, o tubo foi tampado com rolha de silicone e mantido em câmara de incubação do tipo BOD à 35 °C por 7 dias. Posteriormente, o N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> foi determinado conforme o método descrito por Cantarella e Trivelin (2001). O N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> “inicial” não foi determinado antes do período de incubação, conforme indicado no método, para posterior subtração do N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> quantificado após a incubação, pois, segundo Sahrawat e Ponnamparuma (1978), a destilação de suspensões de solo com KCl antes da incubação, usando MgO como alcalinizante, resulta em hidrólise da matéria orgânica do solo em valores altos de pH, ocasionando erros na medida do N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> em solos de regiões tropicais. Além disso, Yagi (2008) observou que a não subtração do N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> “inicial” melhora a estimativa da mineralização do nitrogênio orgânico.

### c) determinação do N acumulado pelo milho

Nas amostras compostas de parte aérea e grãos de milho foi feita a determinação de nitrogênio total, conforme descrito por Carmo et al. (2000). O produto matéria seca x N total das amostras de planta resultou no N acumulado na parte aérea das plantas.

### 3.3. Tratamento estatístico dos dados

Os dados de carbono oxidável e nitrogênio orgânico mineralizável foram submetidos à análise de variância com aplicação do teste F para avaliar o efeito de tratamentos. Em caso de significância, as médias dos tratamentos principais e secundários foram comparadas utilizando o Teste de t de Student a 5% de probabilidade.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Nitrogênio acumulado, concentração de nitrogênio e massa seca da parte aérea das plantas de milho

O resultado dos efeitos de plantas de cobertura cultivadas em pré-safra de milho e, de doses de nitrogênio em cobertura no milho, no N acumulado, na concentração de N e na massa seca da parte aérea das plantas de milho, estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Efeitos de plantas de cobertura e de doses de nitrogênio obtidos pelo teste F nas variáveis da cultura do milho.

Causas de variação	MSPAT <sup>1</sup>		Concentração de N		N acumulado	
	F	CV %	F	CV %	F	CV %
Plantas de cobertura (PC)	1,02 <sup>NS</sup>	10,35	6,07*	9,34	5,91*	13,30
Doses de N (DN)	3,09*	15,96	11,51**	10,47	6,93**	21,76
Interação PC x DN	1,21 <sup>NS</sup>	-	2,33*	-	1,59 <sup>NS</sup>	-

<sup>1</sup>MSPAT: matéria seca da parte aérea total (parte vegetativa + grãos); CV: coeficiente de variação; NS: não significativo a 5% de probabilidade; (\*) e (\*\*): significativo a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente.

A massa seca da parte aérea total (parte vegetativa + grãos – MSPAT) variou apenas com as doses de N (Tabela 2). A MSPAT em função das doses de N, está apresentada na Figura 2.

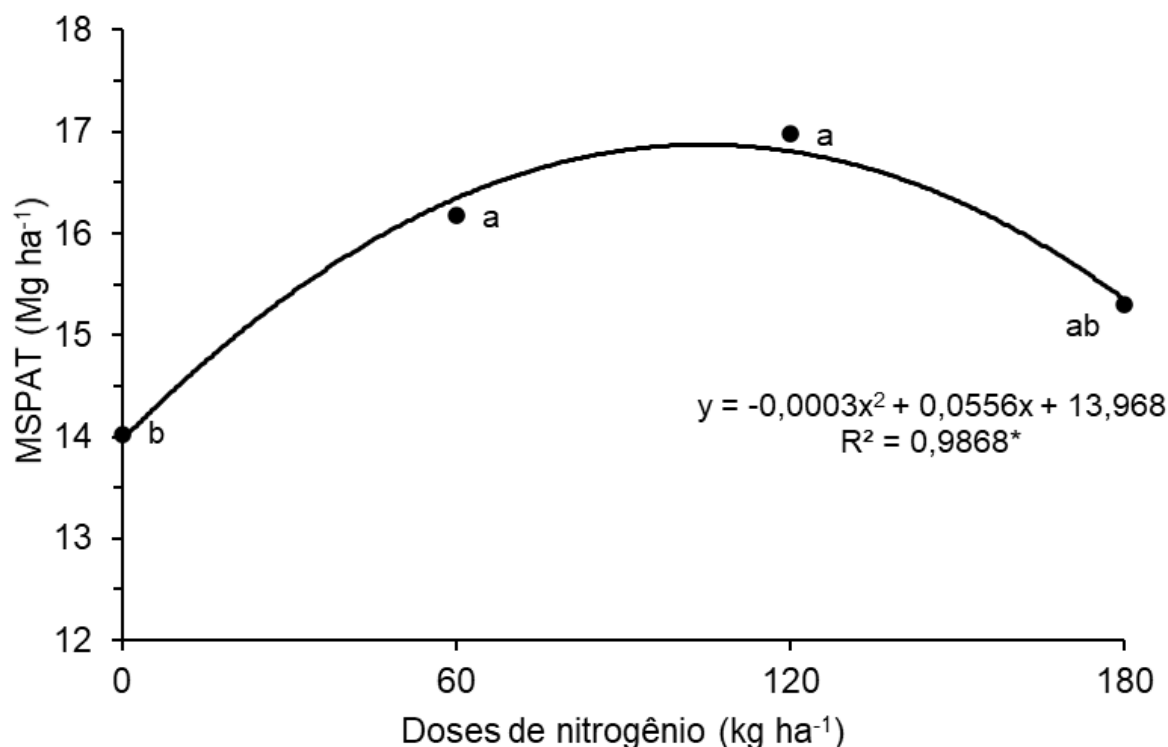


Figura 2. Massa seca da parte aérea total (parte vegetativa + grãos - MSPAT) da cultura do milho, em função de doses de nitrogênio. Médias com letras iguais não diferem entre si pelo Teste t de Student a 5% de probabilidade. (\*) Significativo à 5% de probabilidade pelo teste F.

A MSPAT aumentou até a dose de 120 kg ha<sup>-1</sup> de N, com posterior diminuição até a dose de 180 kg ha<sup>-1</sup> de N. Houve aumento de 16% da MSPAT do tratamento que não recebeu N (dose 0) para o tratamento que recebeu 60 kg ha<sup>-1</sup> de N em cobertura e, de apenas 5% deste último para o que recebeu 120 kg ha<sup>-1</sup> de N, indicando que não houve ganho significativo de MSPAT com doses acima de 60 kg ha<sup>-1</sup> de N. Este resultado, possivelmente pode ser explicado pela maior mineralização de N orgânico no tratamento que recebeu 60 kg ha<sup>-1</sup> de N, na camada de 5-20 cm de profundidade, em comparação com os tratamentos que receberam as maiores doses de 120 e 180 kg ha<sup>-1</sup> de N, (Figuras 11A e 11B).

A concentração de N na parte aérea das plantas de milho variou com as plantas de cobertura, com as doses de N e, ainda, houve interação entre estes fatores (Tabela

2). O desdobramento da interação entre plantas de cobertura e doses de N na concentração de N na parte aérea das plantas de milho está apresentado na Figura 3.

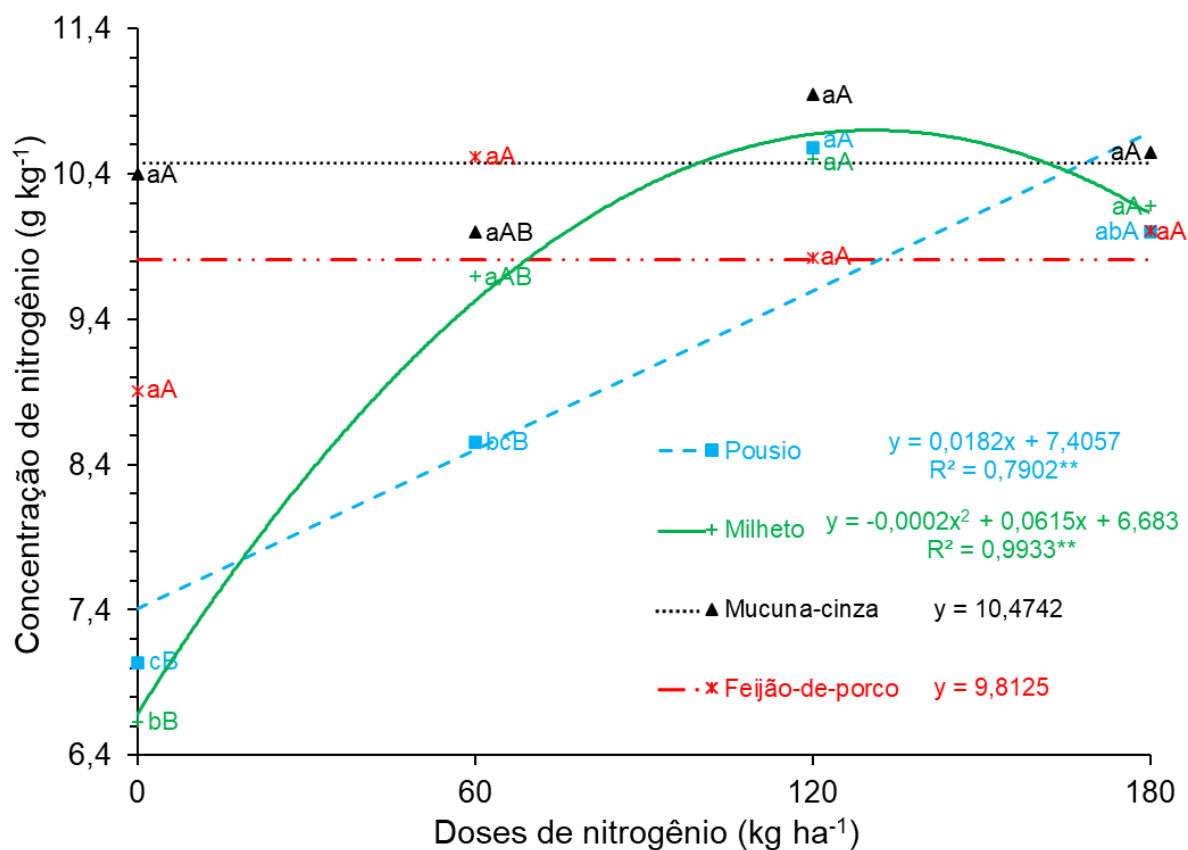


Figura 3. Desdobramento da interação entre plantas de cobertura e doses de nitrogênio para concentração de nitrogênio na parte aérea (parte vegetativa + grãos) da cultura do milho. Letras minúsculas comparam doses dentro de cada planta. Letras maiúsculas comparam plantas dentro de cada dose. Médias com letras iguais não diferem entre si pelo Teste t de Student a 5% de probabilidade. (\*\*) Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F.

A concentração de N não sofreu influência da adubação nitrogenada, quando as leguminosas mucuna-cinza e feijão-de-porco foram cultivadas em pré-safra à cultura do milho, com valores médios de 10,47 e 9,81 g kg<sup>-1</sup>, respectivamente. Estes valores estão próximos aos descritos como adequados para a parte aérea do milho, 10 g kg<sup>-1</sup> (Coelho et al., 1991; Silva et al., 2009) e, indicam o fornecimento de N para o milho pelas leguminosas, sobretudo na ausência de adubação nitrogenada (dose de 0 kg ha<sup>-1</sup> de N), na qual a concentração de N foi maior quando o milho foi cultivado após as leguminosas, em comparação com o cultivo após milheto ou pousio.

Quando foi cultivado o milho em pré-safra, a concentração de N na parte aérea do milho apresentou comportamento quadrático (Figura 3), sendo que os tratamentos que receberam fertilizante nitrogenado apresentaram maior concentração de N em comparação com o tratamento que não recebeu fertilizante. Do tratamento controle, sem adubação nitrogenada, para a dose de 60 kg ha<sup>-1</sup> de N, houve aumento de 46% na concentração de N e, da dose de 60 para a de 120 kg ha<sup>-1</sup> de N houve aumento de apenas 8%. Devido à alta capacidade de produção de biomassa do milho e, do seu sistema radicular profundo (Pereira, 2016), esta espécie aproveita o efeito residual da adubação nitrogenada do milho e recicla N de camadas profundas, disponibilizando-o na superfície do solo através da decomposição dos seus resíduos. Desta forma, o aproveitamento do N pelo milho quando em sucessão ao milho, é maior do que quando em sucessão ao pousio, conforme demonstrado pela maior concentração de N na parte aérea do milho cultivado após o milho, em comparação com o cultivo após o pousio, na dose de 60 kg ha<sup>-1</sup> de N. Além disto, a partir da dose de 60 kg ha<sup>-1</sup> de N, não houve diferença na concentração de N na parte aérea do milho, cultivado após milho ou após as leguminosas.

Com o solo deixado sob pousio, a concentração de N na parte aérea do milho apresentou comportamento linear em função das doses de N (Figura 3). Contudo, o maior valor foi obtido com a aplicação de 120 kg ha<sup>-1</sup> de N, indicando que não houve resposta a partir desta dose. Apenas com a aplicação das doses de 120 e 180 kg ha<sup>-1</sup> de N, a concentração de N foi maior do que o valor estabelecido como adequado, 10 g kg<sup>-1</sup>. Em avaliação anterior no mesmo experimento, Bettiol (2018) observou que a vegetação espontânea (pousio) foi o tratamento que menos adicionou C e N ao solo, resultando em menor teor de carbono orgânico total em comparação com as plantas de cobertura, na camada de 0-10 cm, segundo avaliação feita no mesmo experimento por Mandarino (2020). Desta forma, o potencial de fornecer nitrogênio do solo para o milho através da mineralização do N orgânico neste tratamento deve ser menor, fazendo com que maiores quantidades de N via fertilizante sejam necessárias para aumentar a concentração de N na parte aérea do milho.

Para o N acumulado houve efeito de plantas de cobertura e de doses de N, e não houve interação entre estes fatores (Tabela 2). O efeito das plantas de cobertura no N acumulado está apresentado na Figura 4. O N acumulado pelo milho cultivado

após mucuna-cinza, foi 23 e 19% maior do que quando cultivado após pousio e milho, respectivamente. Quando o milho foi cultivado após o feijão-de-porco, o N acumulado apresentou valor intermediário, não diferindo dos demais tratamentos.

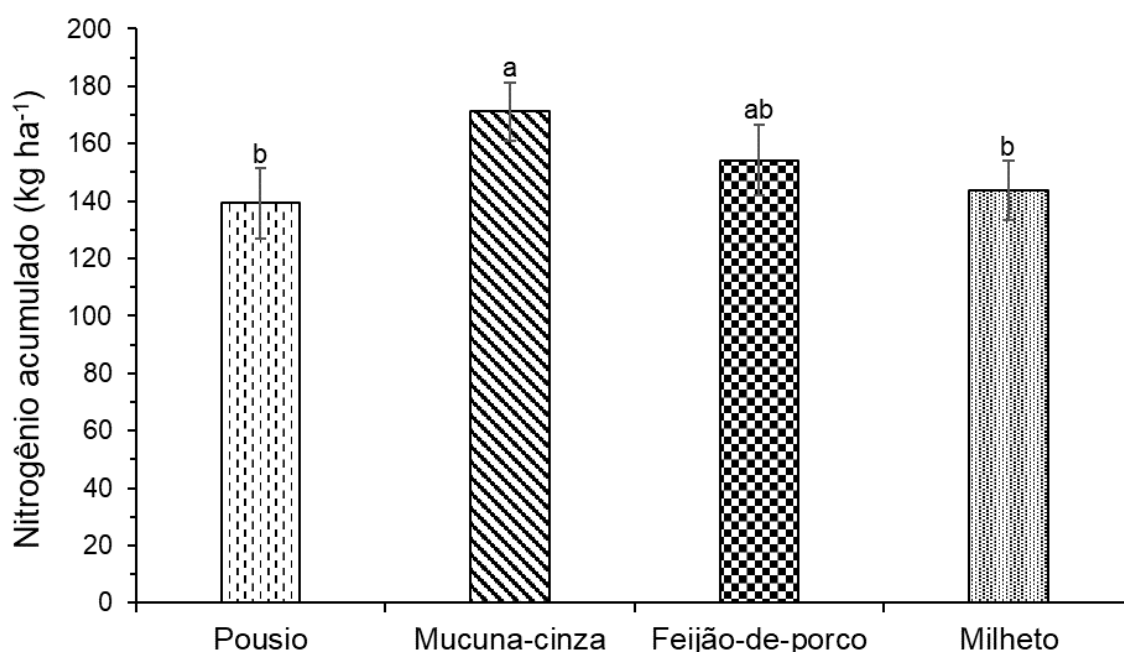


Figura 4. Nitrogênio acumulado pela cultura do milho em função de plantas de cobertura. Médias com letras iguais não diferem entre si pelo Teste t de Student a 5% de probabilidade.

Os maiores valores de N acumulado obtidos nas sucessões do milho com as leguminosas, possivelmente estão relacionados à fixação biológica do N atmosférico (FBN) que ocorre com a mucuna-cinza e o feijão-de-porco. Os resíduos de parte aérea da mucuna-cinza e do feijão-de-porco, apresentam menor relação C/N, conforme avaliação feita anteriormente no mesmo experimento, com valores de 11 e 14, respectivamente, em comparação com 28 e 41 do pousio e milho, respectivamente (Maruyama, 2017). Esta menor relação C/N proporciona maior taxa de decomposição e mineralização do N presente nos resíduos (Aita et al., 2014), o qual pode ser absorvido pela cultura do milho em sucessão. Em estudo feito em Latossolo Vermelho, Spagnollo et al. (2002) obtiveram resultados semelhantes, no qual o N acumulado pela fitomassa das plantas de milho foi maior quando o milho foi cultivado em consórcio com a mucuna-cinza, e apresentou resultado intermediário quando foi

cultivado em consórcio com feijão-de-porco, em comparação com o cultivo de milho solteiro.

O N acumulado em função das doses de N está apresentado na Figura 5. A adubação nitrogenada de cobertura proporcionou maior N acumulado, em comparação com o tratamento que não recebeu fertilizante nitrogenado.

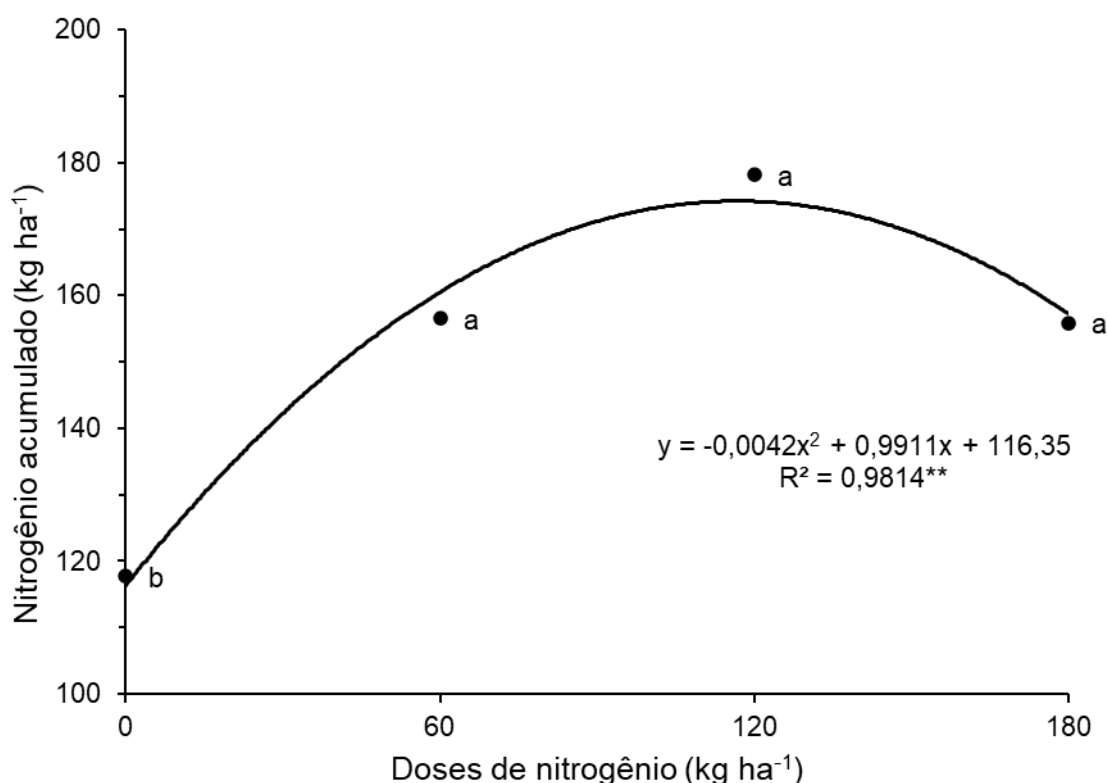


Figura 5. Nitrogênio acumulado pela cultura do milho em função de doses de nitrogênio. Médias com letras iguais não diferem entre si pelo Teste t de Student a 5% de probabilidade. (\*\*) Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F.

Apesar de não haver diferença entre os tratamentos que receberam o fertilizante, houve tendência de diminuição do N acumulado, com doses maiores do que 120 kg ha⁻¹ de N. Este resultado é explicado em parte pela produção de massa seca de parte aérea total (MSPAT), no qual o modelo que melhor se ajustou foi o quadrático, com aumento da produção até a dose de 120 kg ha⁻¹ de N e, posterior redução até a dose de 180 kg ha⁻¹ de N (Figura 2).

Considerando que, de modo geral, cerca de dois terços do N acumulado pelas plantas é alocado nos grãos, e um terço na palha (Duete et al., 2008), o tratamento que recebe 120 kg ha⁻¹ de N, que apresentou o maior valor de N acumulado (178 kg

ha<sup>-1</sup>), exportou cerca de 119 kg de N por hectare pela colheita dos grãos. Esta quantidade de N exportada nos grãos indica que para atender a demanda da cultura e manter o estoque de N no solo, em anos com condições climáticas como as observadas neste trabalho (Figura 1), sobretudo nas sucessões pousio/milho e milheto/milho, nas quais a principal entrada de N é via fertilizante nitrogenado, a aplicação da dose de 120 kg ha<sup>-1</sup> de N é a mais indicada.

#### 4.2. Carbono orgânico lábil

O resultado dos efeitos de plantas de cobertura cultivadas em pré-safra de milho, e de doses de nitrogênio em cobertura no milho, no carbono orgânico lábil (COXP), estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Efeitos de plantas de cobertura e de doses de nitrogênio obtidos pelo teste F no carbono orgânico lábil (COXP).

Causas de variação	Profundidade (cm)					
	0-5		5-10		10-20	
	F	CV %	F	CV %	F	CV %
Plantas de cobertura (PC)	0,34 <sup>NS</sup>	9,80	24,02 <sup>**</sup>	6,72	1,74 <sup>NS</sup>	17,13
Doses de N (DN)	4,26 <sup>*</sup>	8,74	4,04 <sup>*</sup>	11,07	3,24 <sup>*</sup>	13,74
Interação PC x DN	1,55 <sup>NS</sup>	-	2,66 <sup>*</sup>	-	7,65 <sup>**</sup>	-

CV: coeficiente de variação; NS: não significativo a 5% de probabilidade; \* e \*\* significativo a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente.

O teor de COXP, na camada de 0-5 cm, foi influenciado apenas pelas doses de N. Além desta influência, é interessante destacar a ausência do efeito de plantas de cobertura nesta camada, pois era de se esperar que houvesse efeito, uma vez que os resíduos das plantas de cobertura não são incorporados. Possivelmente, esta ausência de efeito ocorreu devido à época de amostragem do solo, que aconteceu entre setembro e outubro de 2018, na fase inicial de crescimento das plantas de cobertura. Após a colheita de grãos de milho em maio de 2018, os restos culturais das plantas foram deixados sobre o solo e, como não há incorporação, a decomposição é mais lenta, devido ao menor contato com o solo (Aita et al., 2014). Além disso, de modo geral, a palha do milho apresenta relação C/N alta, que também diminui a taxa de decomposição dos resíduos (Bertol et al., 2004). Desta forma, é provável que o período para a decomposição da palha se estendeu até o início das chuvas, em agosto

e setembro de 2018 (mês da amostragem de solo), quando a taxa de decomposição da palha provavelmente aumentou, levando ao incremento de compostos orgânicos nesta camada superficial em toda a área experimental, mascarando o efeito das plantas de cobertura na fração de carbono lábil (COXP).

O efeito das doses de N no teor do COXP, na camada de 0-5 cm, está apresentado na Figura 6.

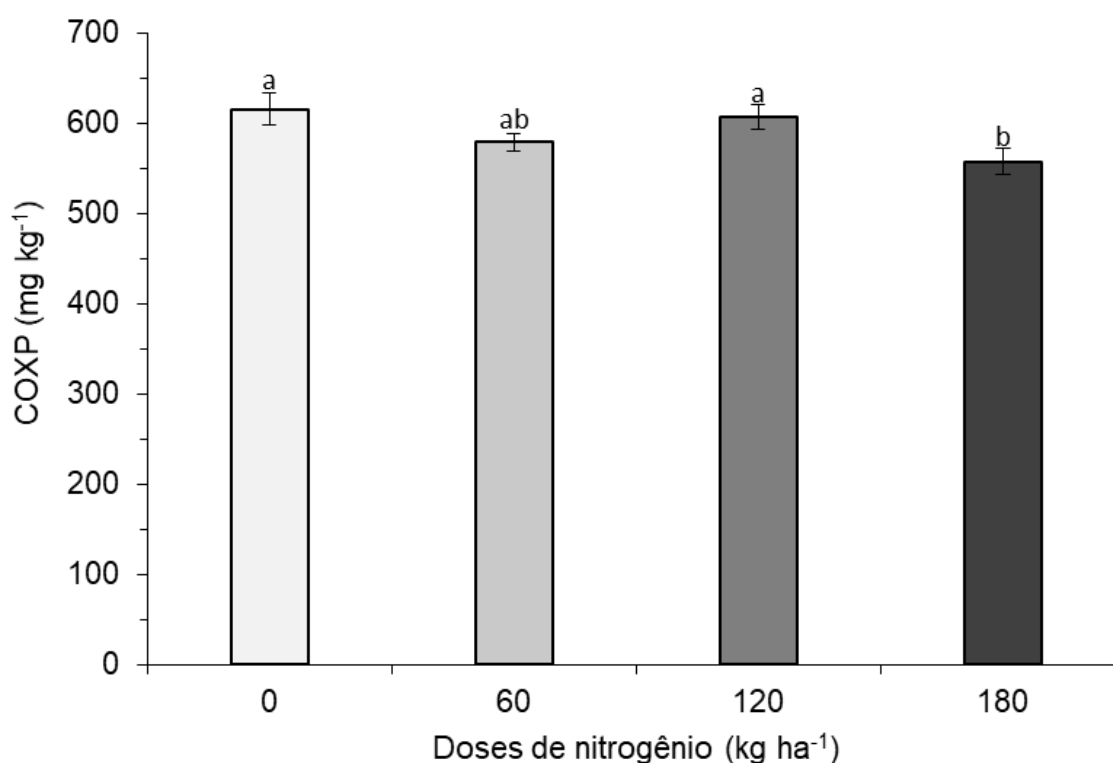


Figura 6. Carbono oxidável em permanganato (COXP) em função de doses de nitrogênio na profundidade de 0-5 cm, com erro padrão da média nas barras. Médias com letras iguais, não diferem entre si pelo Teste t de Student a 5% de probabilidade.

Os maiores teores foram obtidos nos tratamentos controle (sem aplicação de N) e com a aplicação de 120 kg ha<sup>-1</sup> de N, sendo 10 e 9% maiores do que no tratamento que vem recebendo 180 kg ha<sup>-1</sup> de N anualmente, em cobertura, na cultura do milho. O tratamento que recebe 60 kg ha<sup>-1</sup> de N, apresentou teor de COXP intermediário, ao ponto de não diferir dos demais tratamentos.

Na ausência de adubação nitrogenada, a taxa de decomposição da fração lábil é menor, proporcionando o seu acúmulo no solo (Neff et al., 2002), o que possivelmente explica o maior teor de COXP. Por outro lado, a aplicação de N

aumenta a taxa de decomposição da fração lábil (Neff et al., 2002), que associada à baixa entrada de C no solo, pode diminuir o estoque de C nesta fração, visto que o COXP foi positivamente correlacionado à quantidade de matéria seca dos resíduos culturais do milho ( $r = 0,38$ ,  $P < 0,01$ ), nesta camada.

O tratamento que recebe  $120 \text{ kg ha}^{-1}$  de N proporcionou maior entrada de C pelos resíduos culturais do milho (Figura 2), o que pode favorecer a manutenção do estoque de C da fração lábil, apesar da maior taxa de decomposição. Já a menor entrada de C no tratamento que recebe  $180 \text{ kg ha}^{-1}$  de N (Figura 2), possivelmente contribuiu para o menor teor de COXP. Resultados semelhantes foram obtidos por Delbem et al. (2011), os quais observaram que a aplicação de doses elevadas de N, em pastagem de *Brachiaria brizantha*, provocaram a mineralização do carbono orgânico do solo, na camada de 0-10 cm.

Os desdobramentos das interações entre plantas de cobertura e doses de N para o COXP nas camadas de 5-10 e 10-20 cm, estão apresentados na Figura 7.

Na sucessão pousio/milho, o incremento das doses de N diminuiu o teor de COXP em ambas as camadas, sendo a redução mais acentuada na camada de 10-20 cm. O teor de COXP foi 19 e 31% maior, na ausência de adubação nitrogenada, em comparação com a aplicação de  $180 \text{ kg ha}^{-1}$  de N, nas camadas de 5-10 e 10-20 cm, respectivamente. Esta diminuição está possivelmente relacionada à maior taxa de decomposição da fração lábil provocada pela adubação nitrogenada (Neff et al., 2002).

Em avaliação anterior, no mesmo experimento, as raízes das espécies da vegetação espontânea apresentaram relação C/N 15 e, baixa relação lignina/N com valor de 3 em comparação com 5, 5 e 13 para mucuna-cinza, milho e feijão-deporco, respectivamente (Maruyama, 2017). Estas características, proporcionam maior taxa de decomposição dos resíduos, que com a maior disponibilidade de N no solo pela adubação nitrogenada, favorecem o efeito “priming”, provocando a mineralização da fração lábil. Considerando que a concentração de N nas raízes também aumenta com o incremento das doses de N (Coutinho et al., 2013), possivelmente a relação C/N das raízes do milho é menor com a dose de  $180 \text{ kg ha}^{-1}$  de N, o que pode favorecer a mineralização do C da fração lábil (Liang et al., 2017), em comparação com o tratamento sem adubação nitrogenada.

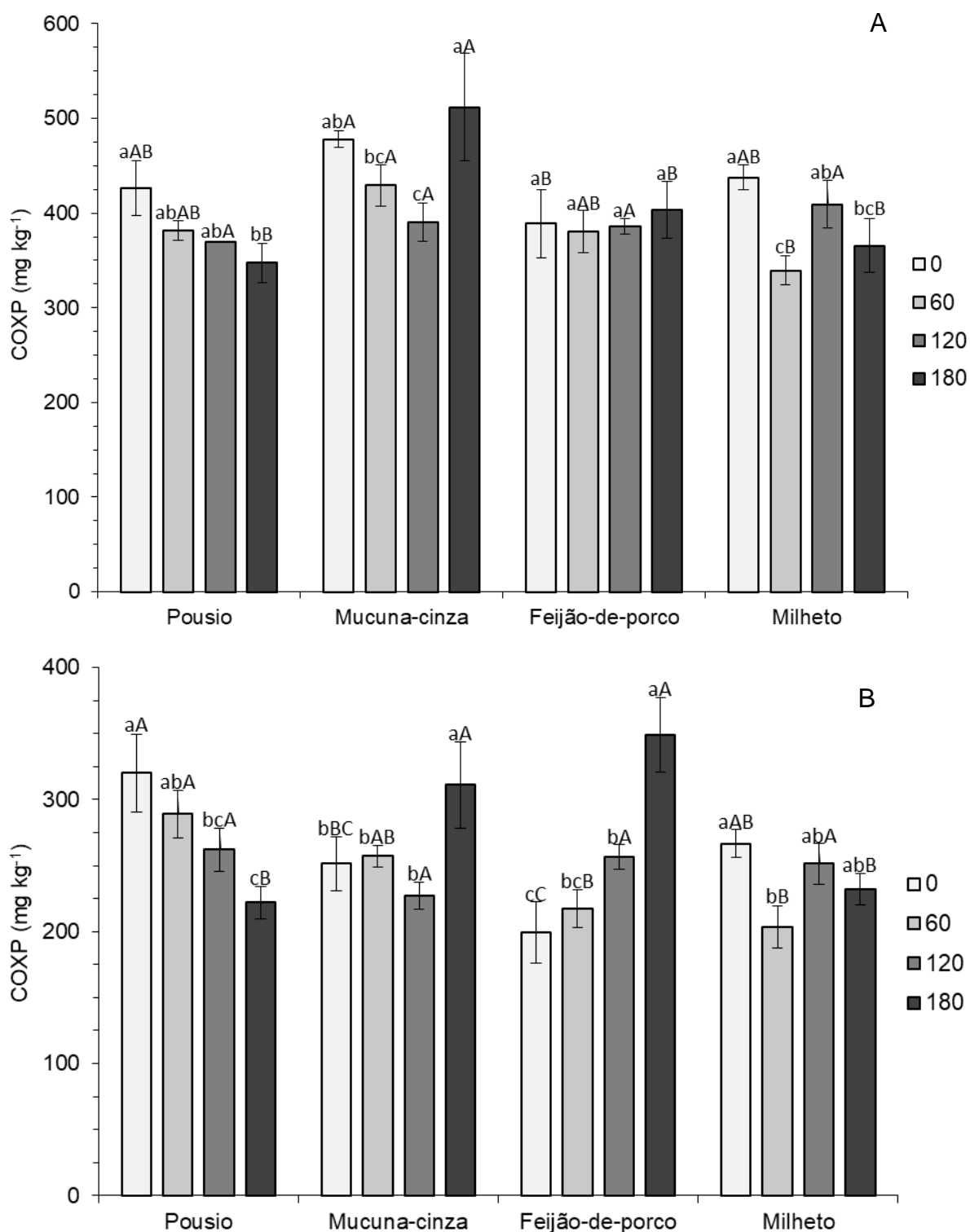


Figura 7. Desdobramento da interação entre plantas de cobertura e doses de nitrogênio para carbono oxidável em permanganato (COXP), na profundidade de 5-10 (A) e 10-20 cm (B). Barras representam o erro padrão da média. Letras minúsculas comparam doses dentro de cada planta. Letras maiúsculas comparam plantas dentro de cada dose. Médias com letras iguais não diferem entre si pelo Teste t de Student a 5% de probabilidade.

Na sucessão mucuna-cinza/milho, a dose de 180 kg ha<sup>-1</sup> de N proporcionou o maior teor de COXP em ambas as camadas. Na camada de 5-10 cm, o cultivo de mucuna-cinza proporcionou o maior teor de COXP em praticamente todas as doses de N, exceto na de 120 kg ha<sup>-1</sup> de N. Possivelmente este resultado está relacionado à composição bioquímica dos resíduos da mucuna-cinza. A mucuna-cinza foi a espécie que apresentou a menor relação C/N de parte aérea (11), em comparação com 14, 28 e 41 do feijão-de-porco, vegetação espontânea e milheto, respectivamente (Maruyama, 2017). Desta forma, a taxa de decomposição dos resíduos é maior (Aita et al., 2014), e alguns compostos orgânicos solúveis de baixa massa molecular podem lixiviar da superfície do solo para esta camada (Gebrim et al., 2008), aumentando o teor de carbono lábil.

Além disso, a mucuna-cinza apresentou a maior porcentagem de lignina nos tecidos da raiz, com valor de 25%, em comparação com 19%, 15% e 15%, do feijão-de-porco, pousio e milheto, respectivamente (Maruyama, 2017). Maior porcentagem de lignina confere resistência à decomposição aos tecidos da raiz, que durante o processo de decomposição podem não compor a fração lábil. Porém, com a elevada disponibilidade de N no solo, proporcionada pela aplicação de 180 kg ha<sup>-1</sup> de N, o processo de decomposição dos resíduos é favorecido (Stewart et al., 2015), podendo os seus produtos serem incorporados à fração lábil.

Na sucessão feijão-de-porco/milho, o incremento das doses de N não influenciou o teor de COXP, na camada de 5-10 cm (Figura 7A). Contudo, na camada de 10-20 cm houve aumento do teor com o incremento das doses (Figura 7B). Na camada de 10-20 cm, de modo semelhante a sucessão milho/mucuna-cinza, a aplicação de 180 kg ha<sup>-1</sup> de N proporcionou o maior teor de COXP, com aumento de 43% em comparação com a ausência da aplicação de N. O feijão-de-porco é uma espécie que apresenta sistema radicular profundo (Wutke et al., 2014), com relação C/N em torno de 42 e lignina/N em torno 13, enquanto as demais espécies apresentam relação C/N em torno de 14, 22 e 15, e relação lignina/N em torno de 5, 5 e 3, para a mucuna-cinza, milheto e pousio, respectivamente (Maruyama, 2017). Desta forma, os resíduos das raízes do feijão-de-porco apresentam menor taxa de decomposição, e podem não ser incorporados à fração lábil. Contudo, o incremento das doses de N,

via fertilizante nitrogenado, favorece o processo de decomposição destes resíduos (Stewart et al., 2015), que por sua vez, pode incrementar a fração lábil.

Na sucessão milheto/milho, assim como na sucessão milho/pousio, a ausência da adubação nitrogenada proporcionou o maior teor de COXP em ambas as camadas, 5-10 e 10-20 cm (Figura 7A e 7B). O segundo maior teor foi obtido com a aplicação de 120 kg ha<sup>-1</sup> de N, que não diferiu da dose de 180 kg ha<sup>-1</sup> de N na camada de 5-10, e que também não diferiu das doses de 180 e 60 kg ha<sup>-1</sup> de N, na camada de 10-20 cm. A ausência da adubação nitrogenada proporciona menor taxa de decomposição da fração lábil (Neff et al., 2002) conforme já mencionado, o que pode proporcionar o acúmulo no solo. O milheto aproveita o efeito residual da adubação nitrogenada, conseqüentemente a sua produção de fitomassa de parte aérea e raiz é influenciada pela dose de N. Desta forma, provavelmente a produção de fitomassa com a dose de 60 kg ha<sup>-1</sup> de N é menor, resultando em menor adição de C e, conseqüentemente, menor COXP.

### 4.3. Nitrogênio orgânico mineralizável

O resultado dos efeitos de plantas de cobertura cultivadas em pré-safra de milho e, de doses de nitrogênio em cobertura no milho, no carbono orgânico lábil (COXP), estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Efeitos de plantas de cobertura e de doses de nitrogênio obtidos pelo teste F sobre o nitrogênio orgânico mineralizável (Nma).

Causas de variação	Profundidade (cm)					
	0-5		5-10		10-20	
	F	CV %	F	CV %	F	CV %
Plantas de cobertura (PC)	9,18**	17,20	1,58 <sup>NS</sup>	24,20	1,19 <sup>NS</sup>	32,30
Doses de N (DN)	3,38*	14,64	3,73*	19,84	2,97*	32,13
Interação PC x DN	1,48 <sup>NS</sup>	-	1,40 <sup>NS</sup>	-	1,47 <sup>NS</sup>	-

CV: coeficiente de variação; NS: não significativo a 5% de probabilidade; \* e \*\* significativo a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente.

O efeito das plantas de cobertura no teor de Nma, na camada de 0-5 cm, está apresentado na Figura 8.

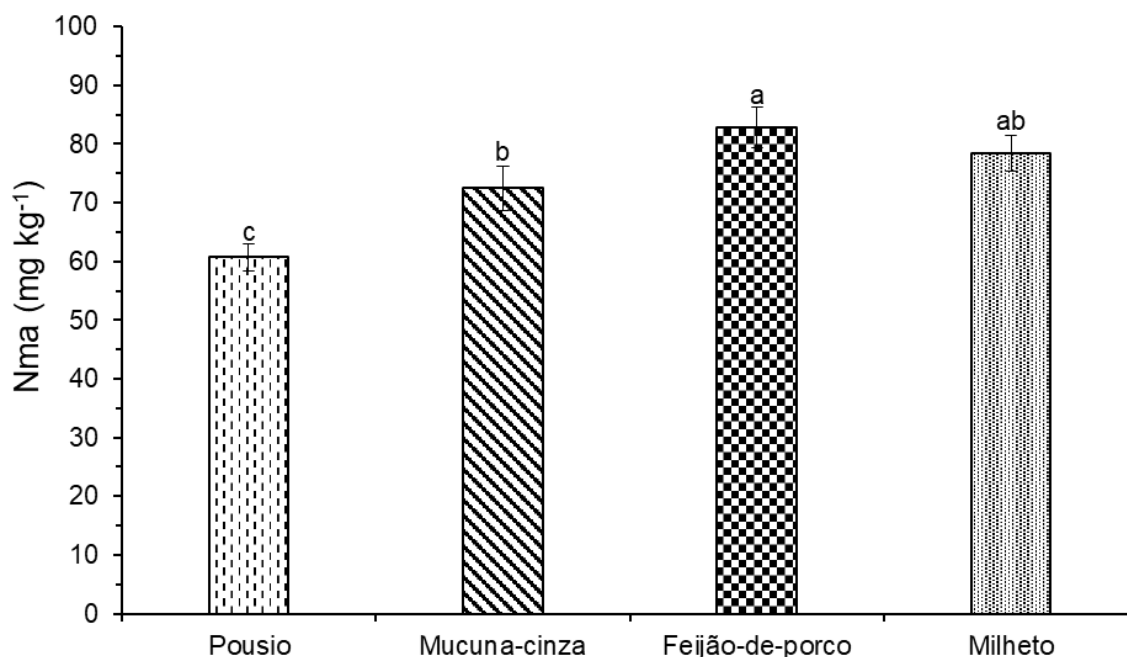


Figura 8. Nitrogênio mineralizável por incubação anaeróbica (Nma) em função de plantas de cobertura, na profundidade de 0-5 cm. Barras representam o erro padrão das médias. Médias com letras iguais não diferem entre si pelo Teste t de Student a 5% de probabilidade.

O cultivo de plantas de cobertura proporcionou maiores teores de Nma em comparação com o solo deixado sob pousio, sendo 27%, 23% e 16% maior para feijão-de-porco, milheto e mucuna-cinza, respectivamente. Deste modo, o incremento do N orgânico mineralizável na camada superficial do solo, proporcionado pelo cultivo em longo prazo das leguminosas (Figura 8), representa uma fonte potencial de N para a cultura do milho, uma vez que a maior parte do N absorvido pela cultura é fornecida pelo solo (Silva et al., 2006).

As espécies da família das fabáceas, feijão-de-porco e mucunas, conhecidas pela capacidade de fixar nitrogênio através da fixação biológica, podem fixar até 190 e 157 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> de nitrogênio, respectivamente (Wutke et al., 2014). Desta forma, a concentração de N nos tecidos de parte aérea destas espécies é maior do que no milheto e na vegetação espontânea (Maruyama, 2017). Após a dessecação da mucuna-cinza e do feijão-de-porco, durante a decomposição dos resíduos da parte aérea, parte deste nitrogênio é incorporado às frações lábeis do carbono orgânico do solo pelos microrganismos, conforme pode ser observado pela correlação positiva ( $r = 0,8574$ ,  $P < 0,001$ ) entre carbono lábil (COXP) e Nma (Figura 9).

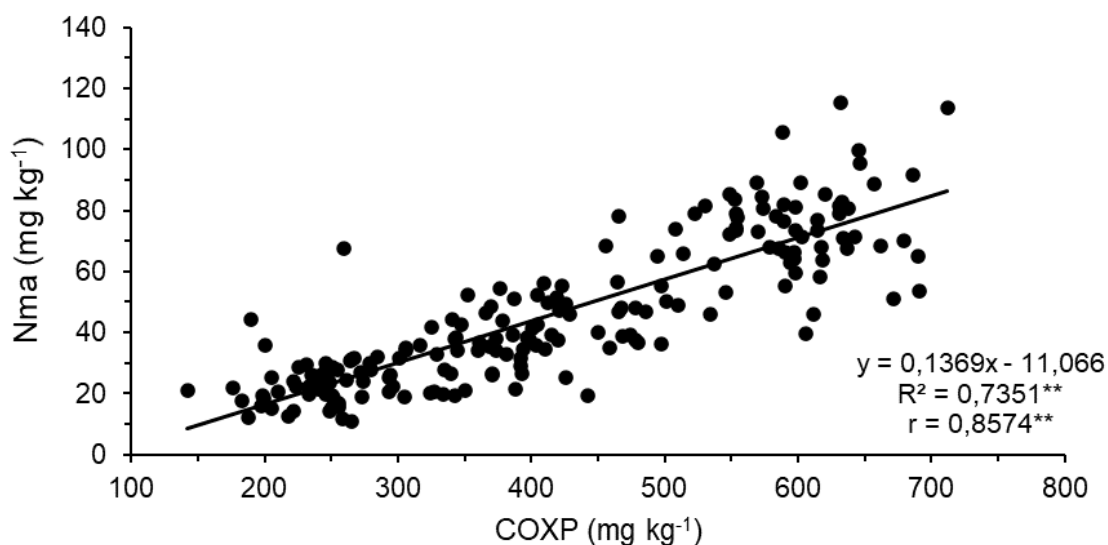


Figura 9. Relação entre carbono oxidável em permanganato (COXP) e nitrogênio mineralizável por incubação anaeróbica (Nma). r: coeficiente de correlação. \*\* significativo a 1% de probabilidade.

Uma outra parte do N resultante da decomposição dos resíduos das fabáceas é absorvida pela cultura do milho, conforme indicado pela concentração de N na parte aérea das plantas de milho, na ausência da aplicação de N (dose 0 kg ha<sup>-1</sup> de N em cobertura) (Figura 3), diminuindo as perdas de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> por lixiviação. Este N absorvido pelo milho, pode ser posteriormente incorporado ao carbono lábil do solo durante a decomposição dos restos das plantas, assim como ocorre com o N resultante da decomposição das fabáceas.

O milheto é uma espécie de poácea, com grande capacidade de ciclagem de nutrientes, em virtude de sua elevada produção de biomassa e do sistema radicular profundo, que pode alcançar até 3 metros de profundidade (Pereira, 2016). Esta característica faz com que parte do N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (oriundo da adubação nitrogenada), que possa ter lixiviado para camadas profundas, seja absorvido pela planta e, posteriormente, disponibilizado durante o processo de decomposição dos resíduos da parte aérea, deixados sobre o solo após a dessecação. Uma fração deste N disponibilizado pode ser incorporado à fração lábil do carbono do solo na camada de 0-5 cm, proporcionando maior Nma do que o pousio (Figura 8). Uma outra fração é absorvida pela cultura do milho, conforme indicado pela concentração de N na parte aérea das plantas de milho cultivadas após milheto, que foi 13% maior em

comparação com o cultivo após o pousio, quando se aplicou a menor dose de N (60 kg ha<sup>-1</sup>) (Figura 3). Este resultado indica maior eficiência do cultivo desta espécie em ciclar N e disponibilizá-lo na camada superficial do que a vegetação espontânea.

O efeito das doses de N no teor de Nma, na camada de 0-5 cm, está apresentado na Figura 10.

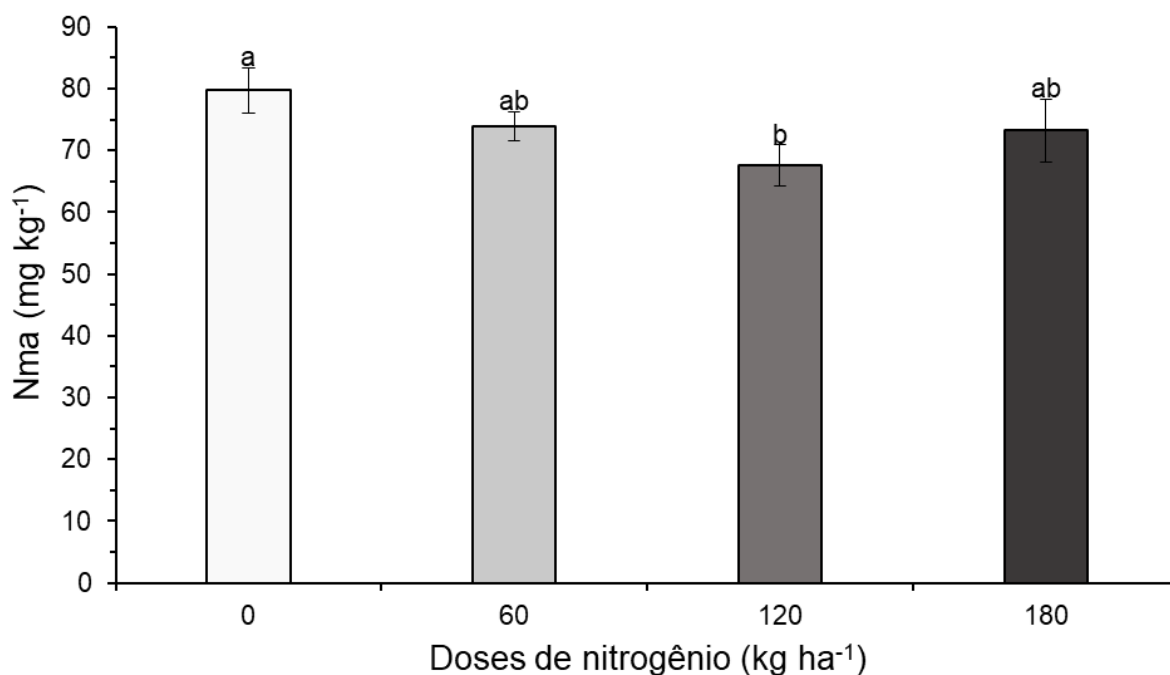


Figura 10. Nitrogênio mineralizável por incubação anaeróbica (Nma) em função de doses de nitrogênio, na profundidade de 0-5 cm. Barras representam o erro padrão da média. Médias com letras iguais não diferem entre si pelo Teste t de Student a 5% de probabilidade.

Assim como ocorreu com o teor de COXP, na camada de 0-5 cm (Figura 6), o teor de Nma foi maior no tratamento controle (sem aplicação de N), com valor de 79,7 mg kg<sup>-1</sup>, sendo 18% maior do que no tratamento que recebe 120 kg ha<sup>-1</sup> de N em cobertura, que apresentou o menor teor, com valor de 67,6 mg kg<sup>-1</sup>. Como o Nma está associado à fração lábil do carbono do solo (Osterholz et al., 2017; Martínez et al., 2018), como observado pela relação entre Nma e COXP (Figura 9), os efeitos da adubação nitrogenada na atividade dos microrganismos do solo, e a consequente mineralização do carbono (Chen et al., 2014), na camada de 0-5 cm, possivelmente explicam a diminuição do Nma com a adubação nitrogenada. Contudo, o Nma foi menor com aplicação de 120 kg ha<sup>-1</sup> de N, enquanto nesta dose o teor de COXP foi

semelhante ao maior teor observado no tratamento referência (Figura 6). A maior exportação de N pela colheita dos grãos de milho nesta dose, visto que é a dose que apresenta a maior quantidade de N acumulado (Figura 5), levando a diminuição do N org e, conseqüentemente do Nma.

Nas camadas de 5-10 e 10-20 cm de profundidade houve efeito apenas das doses de N no Nma (Tabela 4). Os Nmas em função das doses de N para as camadas de 5-10 e 10-20 cm estão apresentados nas Figuras 11A e 11B, respectivamente. Em ambas as camadas os resultados foram semelhantes, sendo que quando se aplicou 60 kg ha<sup>-1</sup> de N em cobertura no milho, o Nma foi maior do que quando se aplicou 120 e 180 kg ha<sup>-1</sup> de N.

Na camada de 5-10 cm, com a aplicação de 60 kg ha<sup>-1</sup> de N, o Nma foi 16% e 26% maior do que com a aplicação de 120 e 180 kg ha<sup>-1</sup> de N, respectivamente. Para a camada de 10-20 cm, a dose de 60 kg ha<sup>-1</sup> de N proporcionou 35% e 30% a mais de Nma do que as doses de 120 e 180 kg ha<sup>-1</sup> de N, respectivamente.

Como o Nma está intimamente ligado a biomassa microbiana do solo (Myrold, 1987), alterações na quantidade desta, refletirão no teor de Nma. A adubação nitrogenada geralmente diminui a biomassa microbiana (Delbem et al., 2011), o que possivelmente pode ter ocorrido com a aplicação das doses de 120 e 180 kg ha<sup>-1</sup> de N, levando a diminuição do Nma.

Conforme citado anteriormente, a adubação nitrogenada aumenta a taxa de decomposição do C lábil (Neff et al., 2002), que também está intimamente ligado ao Nma, podendo levar a diminuição do mesmo. Ainda, a disponibilidade de N no solo durante o ciclo do milho, influencia na rizodeposição de N, que ocorre principalmente na forma inorgânica em solos com alta disponibilidade deste nutriente, enquanto em solos com baixa disponibilidade de N, ocorre predominantemente na forma orgânica (Wichern et al., 2008). Este aumento de N inorgânico também pode proporcionar a decomposição de carbono orgânico do solo (Chen et al., 2014), levar a diminuição do N org e, conseqüentemente, do Nma.

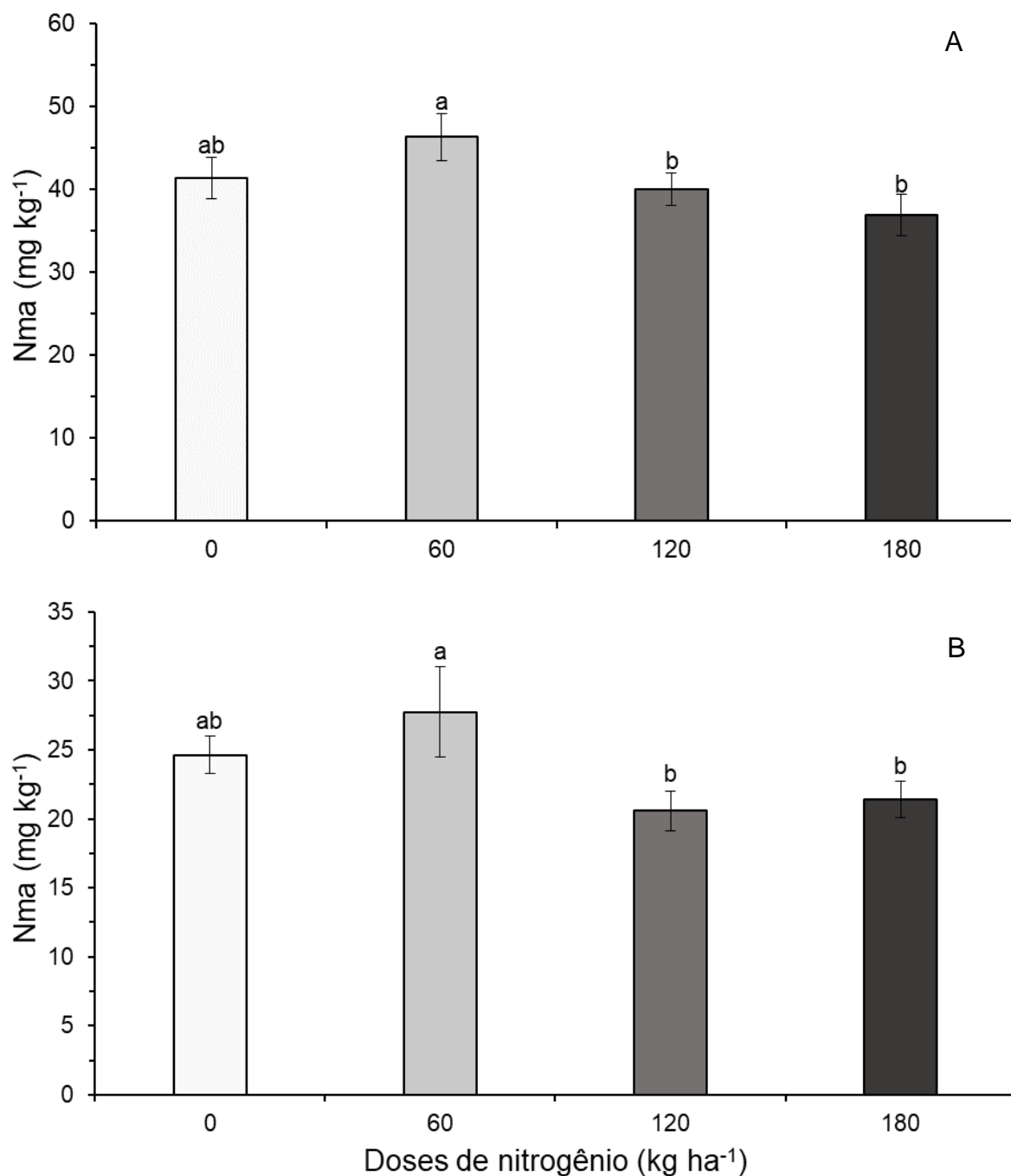


Figura 11. Nitrogênio mineralizável por incubação anaeróbica (Nma) em função de doses de nitrogênio, na profundidade de 5-10 (A) e 10-20 cm (B). Barras representam o erro padrão da média. Médias com letras iguais não diferem entre si pelo Teste t de Student a 5% de probabilidade.

O maior teor de Nma no tratamento que recebe 60 kg ha<sup>-1</sup> de N deve ter contribuído para a ausência de diferença significativa entre e as doses de 60 e de 120 kg ha<sup>-1</sup> de N na MSPAT (Figura 2). Apesar desta associação entre as variáveis, não houve correlação da massa seca de parte aérea total, N acumulado e concentração

de nitrogênio da parte aérea das plantas de milho, com o nitrogênio mineralizável por incubação anaeróbica ou com o carbono oxidável em permanganato. Em outros estudos, no entanto, foram relatadas correlações positivas entre concentração de N na parte aérea do milho e Nma (0,77), N acumulado pelas plantas de milho e Nma (0,65) (Yagi, 2008) e, N total da parte aérea do milho com o COXP (0,43) (Culman et al., 2013), demonstrando o fornecimento de N para as plantas de milho através da mineralização da fração lábil do carbono do solo. Possivelmente, a ausência de correlação observada neste estudo, se deve ao momento da amostragem do solo, que ocorreu cerca de três meses antes da semeadura do milho (Figura 1). No trabalho de Yagi (2008), o Nma foi determinado 32 dias antes da semeadura do milho e, no trabalho de Culman et al. (2013), o COXP foi determinado por ocasião da semeadura. Além disto, o Nma e o COXP apresentam variação sazonal significativa (Clark et al., 2019; Culman et al., 2013), o que pode ter influenciado na ausência de correlação com variáveis de fornecimento de N do solo para as plantas de milho.

## 5. CONCLUSÕES

A aplicação da maior dose de nitrogênio ( $180 \text{ kg ha}^{-1}$  de N) proporcionou menor teor de carbono orgânico lábil na camada de 0-5 cm de profundidade, independentemente da planta de cobertura, e abaixo de 5 cm, até 20 cm, quando o milho foi cultivado após o pousio. Contudo, proporcionou maior teor quando o milho foi cultivado após as leguminosas mucuna-cinza e feijão-de-porco, na camada de 10-20 cm, demonstrando que o carbono lábil responde de forma diferente à adubação nitrogenada nesta camada, dependendo da espécie de cobertura.

Os cultivos de feijão-de-porco, milheto e mucuna-cinza em pré-safra de milho proporcionaram maior teor de nitrogênio orgânico mineralizável (Nma) na camada de 0-5 cm, do que a sucessão milho/pousio.

A aplicação das maiores doses de nitrogênio ( $120$  e  $180 \text{ kg ha}^{-1}$  de N), proporcionaram menor teor de Nma, nas camadas de 5-10 e 10-20 cm de profundidade.

O Nma aumentou à medida que o C orgânico lábil aumentou, mas não houve correlação do Nma com o nitrogênio acumulado pelas plantas de milho, demonstrando

que, neste estudo, o Nma não explicou o fornecimento de nitrogênio do solo para o milho.

## 6. REFERÊNCIAS

Aita C, Giacomini SJ, Ceretta CA (2014) Decomposição e liberação de nutrientes dos resíduos culturais de adubos verdes. In: Filho OFL, Ambrosano EJ, Rossi F, Carlos JAD (Eds.) **Adubação verde e plantas cobertura no Brasil: fundamentos e prática**. Brasília: Embrapa, v. 1, p. 225-264.

Amado TJC, Bayer C, Eltz FLF, Brum ACR (2001) Potencial de culturas de cobertura em acumular carbono e nitrogênio no solo no plantio direto e a melhoria da qualidade ambiental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 25:189-197.

Andrioli I, Centurion JF (1999) Levantamento detalhado dos solos da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO. **Resumos...** Brasília, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, CD-ROM.

Bertol I, Leite D, Zondan WA (2004) Decomposição do resíduo de milho e variáveis relacionadas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 28:369-375.

Bettiol ACT (2018) **Avaliação do nitrogênio orgânico mineralizável em solo cultivado com milho em sucessão a plantas de cobertura**. 52 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – UNESP, Jaboticabal.

Blair GJ, Lefroy RDB, Lisle L (1995) Soil carbon fractions, based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems. **Australian Journal of Agriculture Research** 46:1459-1466.

Bongiorno G, Bünemann EK, Oguejuofor CU, Meier J, Gort G, Comans R, Mäder P, Brussaard L, Goede R (2019) Sensitivity of labile carbon fractions to tillage and organic matter management and their potential as comprehensive soil quality indicators across pedoclimatic conditions in Europe. **Ecological Indicators** 99:38-50.

Camargo OA, Moniz AC, Jorge JA, Valadares JMAS (2009) **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agronômico de Campinas**. Campinas: Instituto Agronômico, 77p. (Boletim técnico, 106)

Cantarella H, Trivelin PC (2001) Determinação de nitrogênio inorgânico em solo pelo método da destilação a vapor. In.: Rajj B, Andrade JC, Cantarella H, Quaggio JA (Eds.) **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: IAC, p. 270-276.

Carmo CAFS, Araújo WS, Bernardi ACC, Saldanha MFC (2000) **Métodos de análise de tecidos vegetais utilizados na Embrapa solos**. Rio de Janeiro: Embrapa: Solos, 41 p. (Embrapa-Solos. Circular Técnica, 6).

Capriel P (1997) Hydrophobicity of organic matter in arable soils: influence of management. **European Journal of Soil Science** 48:457-462.

Chen R, Senbayram M, Blagodatsky S, Myachina O, Dittert K, Lin X, Blagodatskaya E, Kuzyakov Y (2014) Soil C and N availability determine the priming effect: microbial N mining and stoichiometric decomposition theories. **Global Change Biology** 20:2356-2367.

Clark JD, Veum KS, et al. (2019) United States midwest soil and weather conditions influence anaerobic potentially mineralizable nitrogen. **Soil Science Society of America Journal** 83:1137-1147.

Coelho AM, França GE, Bahia AEC, Guedes GAA (1991) Balanço de nitrogênio <sup>15</sup>N em um Latossolo Vermelho-Escuro, sob vegetação de cerrado, cultivado com milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 15:187-193.

Coutinho AM, Soares ER, Silva MS, Peixoto FR, Corá JE, Coutinho ELM (2013) Densidade de raízes de milho em função de estratégias de aplicação de N e de plantas de entressafra. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, **Anais...** Florianópolis: SBCS, p. 1-4.

Culman SW, Snapp SS et al. (2012) Permanganate oxidizable carbon reflects a processed soil fraction that is sensitive to management. **Soil Science Society of America Journal** 76:494-504.

Culman SW, Snapp SS, Green JM, Gentry L (2013) Short- and long-term labile soil carbon and nitrogen dynamics reflect management and predict corn agronomic performance. **Agronomy Journal** 105:493-502.

Delbem FC, Scabora MH, Soares CV, Heinrichs R, Crociolli CA, Cassiolato AMR (2011) Fontes e doses de adubação nitrogenada na atividade microbiana e fertilidade do solo cultivado com *Brachiaria brizantha*. **Acta Scientiarum. Agronomy** 33:361-367.

Duete RRC, Muraoka T, Silva EC, Trivelin PCO, Ambrosano EJ (2008) Manejo da adubação nitrogenada e utilização do nitrogênio (<sup>15</sup>N) pelo milho em Latossolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 32:161-171.

Gardner JB, Drinkwater LE (2009) The fate of nitrogen in grain cropping systems: a meta-analysis of <sup>15</sup>N field experiments. **Ecological Applications** 19:2167-2184.

Gebrim FO, Silva IR, Novais RF, Vergütz L, Procópio LC, Nunes TN, Jesus GL (2008) Lixiviação de cátions favorecida pela presença de ânions inorgânicos e ácidos orgânicos de baixa massa molecular em solos adubados com camas de aviário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 32:2255-2267.

Heitkamp F, Raupp J, Ludwig B (2009) Impacto fertilizer type and rate on carbono and nitrogen pools in a Sandy Cambisol. **Plant and Soil** 319:259-275.

Keeney DR, Bremner JM (1966) Comparison and evaluation of laboratory methods of obtaining an index of soil nitrogen availability. **Agronomy Journal** 58:498-503.

Lefroy RDB, Blair GJ, Strog WM (1993) Changes in soil organic matter with cropping as measured by organic carbono fractions and <sup>13</sup>C natural isotope abundance. **Plant and Soil** 155:399-402.

Liang X, Yuan J, Yang E, Meng (2017) J Responses of soil organic carbon decomposition and microbial community to the addition of plant residues with different C:N ratio. **European Journal of Soil Biology** 82:50-55.

Loginow W, Wisniewski W, Gonet SS, Ciescinska B (1987) Fractionation of organic carbon based on susceptibility to oxidation. **Polish Journal of Soil Science** 20:47-52.

Lucas ST (2004) **Evaluation of labile soil carbon test for prediction of soil productivity response to organic matter management**. 220 f. Dissertação (Mestrado em Ciência) – Universidade de Maryland, College Park.

Mahal NK, Castellano MJ, Miguez FE (2018) Conservation agriculture practices increase potentially mineralizable nitrogen: a meta-analysis. **Soil Science Society of America Journal** 82:1270-1278.

Maia CE, Cantarutti RB (2004) Acumulação de nitrogênio e carbono no solo pela adubação orgânica e mineral contínua na cultura do milho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** 8:39-44.

Mandarino AP (2020) **Atributos químicos de Latossolo Vermelho em função de plantas de cobertura e adubação nitrogenada**. 44 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – UNESP, Jaboticabal.

Martínez JM, Galantini JA, Duval ME (2018) Contribution of nitrogen mineralization índices, labile organic matter and soil properties in predicting nitrogen mineralization. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition** 18:73-89.

Maruyama FFA (2017) **Agregação e carbono orgânico de um Latossolo cultivado por quatorze anos nos sistemas convencional e plantio direto**. 32 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – UFV, Rio Paranaíba.

Myrold DD (1987) Relationship between microbial biomass nitrogen and a nitrogen availability index. **Soil Science Society of America Journal** 51:1047-1049.

Moore EB, Wiedenhoef MH, Kaspar TC, Cambardella CA (2014) Rye cover crop effects on soil quality in no-till corn silage-soybean cropping systems. **Soil Science Society of America Journal** 78:968-976.

Neff JC, Townsend AR, Gleixner G, Lehman SJ, Turnbull J, Bowman WD (2002) Variable effects of nitrogen additions on the stability and turnover of soil carbon. **Nature** 419:915-917.

Osterholz WR, Rinot O, Shaviv A, Linker R, Liebman M, Sanford G, Stroock J, Castellano MJ (2017) Predicting gross nitrogen mineralization and potentially mineralizable nitrogen using soil organic matter properties. **Soil Science Society of America Journal** 81:1115-1126.

Pereira IA (2016) **Cultivo do Milheto – Sistemas de Produção Embrapa**. Brasília: Embrapa, (Versão Eletrônica).

Pires AMM, Andrade CA, Souza NAP, Carmo JB, Coscione AR, Carvalho CS (2015) Disponibilidade e mineralização do nitrogênio após aplicações sucessivas de lodo de esgoto no solo, estimadas por meio de incubação anaeróbica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 50:333-342.

Poirier N; Sohi SP, Gaunt JL, Mahieu N, Randall EW, Powlson DS, Evershed RP (2005) The chemical composition of measurable soil organic matter pools. **Organic Geochemistry** 36:1174-1189.

Puri AN, Sarup A (1937) Studies in soil humus: I. Estimation of soil humus by oxidation with alkaline permanganate. **Soil Science** 44:323-329.

Raij BV, Andrade JC, Cantarella H, Quaggio JA (2001) **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agronômico, 235 p.

Sahrawat KL, Ponnampereuma FN (1978) Measurement of exchangeable  $\text{NH}_4^+$  in tropical rice soils. **Soil Science Society of America Journal** 42:282-283.

Santos AC, Carvalho MAC, Yamashita OM, Tavanti TR, Tavanti RFR (2019) Maize productivity in succession to cover crops, nitrogen fertilization and inoculation with *Azospirillum brasilense*. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** 23:966-971.

Silva EC, Muraoka T, Buzetti S, Veloso MEC, Trivelin PCO (2006) Absorção de nitrogênio nativo do solo pelo milho sob plantio direto em sucessão a plantas de cobertura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 30:723-732.

Silva EC, Muraoka T, Villanueva FCA, Espinal FSC (2009) Aproveitamento de nitrogênio pelo milho, em razão da adubação verde, nitrogenada e fosfatada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 44:118-127.

Spagnollo E, Bayer C, Wildner LP, Ernani PR, Albuquerque JA, Proença MM (2002) Leguminosas estivais intercalares como fonte de nitrogênio para o milho, no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 26:417-423.

Spargo JT, Cavigelli MA, Mirsky SB, Maul JE, Meisinger JJ (2011) Mineralizable soil nitrogen and labile soil organic matter in diverse long-term cropping systems. **Nutrient Cycling in Agroecosystems** 90:253-266.

Stanford G (1978) Evaluation of ammonium release by alkaline ammonium extraction as an index of soil nitrogen availability. **Soil Science** 126:244-253.

Stanford G, Smith SJ (1972) Nitrogen mineralization potential of soils. **Soil Science Society of America Proceedings** 36:465-472.

Stewart CE, Moturi P, Follet RF, Halvorson AD (2015) Lignin biochemistry and soil N determine crop residue decomposition and soil priming. **Biogeochemistry** 124:335-351.

Strosser E (2010) Methods for determination of labile soil organic matter: An overview. **Journal of Agrobiology** 27:49-60.

Terçariol MC (2020) **Formas lábeis de carbono e nitrogênio no solo em função de plantas de cobertura e adubação nitrogenada**. 41 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – UNESP, Jaboticabal.

Wang F, Weil RR, Nan X (2017) Total and permanganate-oxidizable organic carbon in the corn rooting zone of US Coastal Plain soils as affected by forage radish cover crops and N fertilizer. **Soil & Tillage Research** 165:247-257.

Waring SA, Bremner JM (1964) Ammonium production in soil under waterlogged conditions as an index of nitrogen availability. **Nature** 201:951-952.

Wichern F, Eberhardt E, Mayer J, Joergensen RG, Müller T (2008) Nitrogen rhizodeposition in agricultural crops: Methods, estimates and future prospects. **Soil Biology and Biochemistry** 40:30-48.

Weil RR, Islam KR, Stine MA, Gruver JB, Samson-Liebig SE (2003) Estimating active carbon for soil quality assessment: a simplified method for laboratory and field use. **American Journal of Alternative Agriculture** 18:3-17.

Wutke EB, Calegari A, Wildner LP (2014) Espécies de adubos verdes e plantas de cobertura e recomendações para seu uso. In: Filho OFL, Ambrosano EJ, Rossi F, Carlos JAD (Eds.) **Adubação verde e plantas cobertura no Brasil: fundamentos e prática**. Brasília: Embrapa, v. 1, p. 60-168.

Yagi R (2008) **Métodos químicos para a estimativa do nitrogênio disponível do solo**. 120 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Unesp, Jaboticabal.