

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP  
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**ATRIBUTOS QUÍMICOS DE LATOSSOLO VERMELHO EM  
FUNÇÃO DE PLANTAS DE COBERTURA E ADUBAÇÃO  
NITROGENADA**

**Adriano Pereira Mandarino**

Engenheiro Agrônomo

**2020**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP  
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**ATRIBUTOS QUÍMICOS DE LATOSSOLO VERMELHO EM  
FUNÇÃO DE PLANTAS DE COBERTURA E ADUBAÇÃO  
NITROGENADA**

**Adriano Pereira Mandarino**

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

**Coorientador: Prof. Dr. Itamar Andrioli**

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**

M271a      Mandarino, Adriano Pereira  
Atributos químicos de Latossolo Vermelho em função de plantas de  
cobertura e adubação nitrogenada / Adriano Pereira Mandarino. -- ,  
2020  
44 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),  
Faculdade de Ciências Farmacêuticas, Araraquara,  
Orientador: Mara Cristina Pessôa da Cruz  
Coorientador: Itamar Andrioli

1. Matéria orgânica. 2. Fertilidade do solo. 3. Carbono orgânico  
total. 4. Carbono orgânico solúvel. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Farmacêuticas, Araraquara. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.



## **DADOS CURRICULARES DO AUTOR**

**ADRIANO PEREIRA MANDARINO** – nascido no dia 25 de agosto de 1995 na cidade de Mirassol D'Oeste – MT. Concluiu o ensino médio em 2012 e no ano seguinte iniciou a graduação. Obteve o grau de Engenheiro Agrônomo pela Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT) câmpus Cáceres no ano de 2017. Durante a graduação foi aluno de iniciação científica no Laboratório de Solos e Nutrição de Plantas da mesma universidade, sendo bolsista PROBIC (2013-2014) e FAPEMAT (2015-2016), participando do projeto “Estoques de carbono e atributos de um Latossolo com ocorrência de morte súbita e diferentes sistemas de cultivo no sudoeste do Mato Grosso”. Neste período trabalhou com resistência do solo à penetração e atributos químicos de Neossolo com ocorrência de morte súbita de braquiária. Em 2018 deu início ao mestrado na Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (Unesp/FCAV) câmpus de Jaboticabal, sendo que, de março do mesmo ano a agosto de 2019 foi bolsista CAPES no Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Ciência do Solo). Durante o mestrado fez parte do grupo de pesquisa do Laboratório de Fertilidade do Solo da mesma instituição e na safra 2018/2019 trabalhou com atributos químicos de solo cultivado com plantas de cobertura em pré safra a cultura do milho e com variação de doses de nitrogênio em cobertura no milho durante 18 anos.

Se alguém ama o mundo, o amor do Pai não está nele.  
Pois tudo o que há no mundo (a paixão da carne, a cobiça dos olhos e a ostentação  
dos bens) não provém do Pai, mas do mundo.  
O mundo e a sua cobiça passam, mas aquele que faz a vontade de Deus viverá  
para sempre.

**1 João 2:15-17**

Ao meu pai, Júlio Perpétuo  
Mandarino, à minha mãe, Valdirene  
Pereira Santos Mandarino, e ao meu filho,  
Emanuel Miguel Rocha Mandarino.

**Dedico.**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus pela saúde e por todas as oportunidades concedidas, por todas as pessoas que colocou em meu caminho e por ter me dado força para que eu pudesse superar os desafios e chegar até aqui.

Aos meus pais, Júlio e Valdirene, por terem me apoiado e me incentivado, nunca me deixando faltar e, acima de tudo, me deixando livre para fazer as minhas escolhas.

Ao meu filho Emanuel Miguel, que mesmo na inocência de uma criança, me motivou e motiva para que eu conquiste meus objetivos e não desista.

À professora Mara Cristina Pessôa da Cruz, pela qual tenho profunda admiração por carregar tanta sabedoria, conhecimento e, acima de tudo, humildade. Pessoa que vou levar para o resto da vida como exemplo de profissional e de ser humano. Sempre com conselhos sábios que me orientaram no mestrado e na minha vida pessoal também.

Ao professor Manoel Evaristo, sempre disposto a ajudar com sua experiência e a dar opiniões valiosas para desenvolvimento do meu trabalho, na teoria e na prática.

Ao professor Itamar Andrioli pela coorientação e por ter cedido a área do experimento para que eu pudesse realizar este trabalho.

Aos professores Manoel Evaristo e Lucas Boscov Braos pelas contribuições no exame geral de qualificação.

Aos companheiros e amigos de laboratório, Denise, Roberta, Kamila, Natã, Alaor, Gilberto, Samira, Amanda e Ivã, que me ajudaram e me incentivaram sempre.

Agradeço a todos que fizeram parte desse momento da minha história, e a todos que fizeram com que a minha passagem por Jaboticabal fosse tão enriquecedora para a minha vida.

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

**Muito obrigado.**

## SUMÁRIO

	Página
RESUMO .....	ii
ABSTRACT.....	iii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA .....	2
2.1. Plantas de cobertura e adubação verde.....	2
2.1.1. Feijão-de-porco ( <i>Canavalia ensiformis</i> L.).....	4
2.1.2. Mucuna-cinza ( <i>Mucuna nivea</i> ).....	4
2.1.3. Milheto ( <i>Pennisetum glaucum</i> L.).....	5
2.2. Influência das plantas de cobertura e da adubação nitrogenada na qualidade química do solo .....	5
2.2.1. Matéria orgânica do solo .....	6
2.2.2. Carbono orgânico solúvel em água (COS).....	9
2.2.3. Efeitos da adubação nitrogenada nos atributos químicos do solo .....	10
3. MATERIAL E MÉTODOS .....	12
3.1. Localização, solo, clima e histórico .....	12
3.2. Delineamento experimental e tratamentos na safra 2018/2019.....	13
3.3. Amostragem de solo e atributos avaliados.....	13
3.4. Análise estatística .....	15
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	16
4.1. Carbono orgânico total (COT) .....	16
4.2. Carbono orgânico solúvel (COS).....	18
4.3. pH em CaCl <sub>2</sub> (0,01 mol L <sup>-1</sup> ) e acidez total (H+Al) .....	20
4.4. Cálcio (Ca <sup>2+</sup> ), magnésio (Mg <sup>2+</sup> ) e potássio (K <sup>+</sup> ) trocáveis .....	23
a) Efeito das plantas de cobertura.....	23
4.5. Soma de bases (SB).....	30
4.6. Capacidade de troca de cátions total (CTC) .....	32
4.7. Porcentagem de saturação por bases (V%).....	34
5. CONCLUSÕES.....	36
6. REFERÊNCIAS .....	36



## ATRIBUTOS QUÍMICOS DE LATOSSOLO VERMELHO EM FUNÇÃO DE PLANTAS DE COBERTURA E ADUBAÇÃO NITROGENADA

**RESUMO** – O uso de plantas de cobertura é uma das práticas sustentáveis mais econômicas para promover melhorias na qualidade física, química e biológica do solo. O objetivo com este trabalho foi avaliar o efeito do cultivo de plantas de cobertura em pré-safra a cultura do milho e da adubação nitrogenada de cobertura no milho na qualidade do solo em experimento de longa duração. O experimento está instalado em área de LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico de textura argilosa e vem sendo conduzido há 18 anos em delineamento em blocos casualizados com parcelas subdivididas e quatro repetições. Os tratamentos principais são: feijão-de-porco, milheto, mucuna-cinza e vegetação espontânea (pousio). Os tratamentos secundários são doses de N em cobertura na cultura do milho (0, 60, 120 e 180 kg ha<sup>-1</sup> de N). Foram avaliados o carbono orgânico total, o carbono orgânico solúvel em água, cálcio, magnésio e potássio trocáveis e, por cálculo, foram obtidos os valores de soma de bases, capacidade de troca de cátions e saturação por bases, de amostras de solo coletadas em 0-5 cm, 5-10 cm e 10-20 cm de profundidade. As plantas de cobertura proporcionaram maior teor de carbono orgânico total em comparação com o pousio nas camadas de 0-5 e 5-10 cm. Nestas camadas, as plantas de cobertura apresentaram aumento, na média das espécies, de 3,51 g kg<sup>-1</sup> e de 1,7 g kg<sup>-1</sup> de carbono orgânico total, respectivamente. Nas mesmas camadas, o aumento médio no carbono orgânico solúvel em água devido às plantas de cobertura foi de 130 mg kg<sup>-1</sup> e 68,4 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente. Apesar do aumento do carbono orgânico total nas duas camadas superficiais, a capacidade de troca de cátions aumentou apenas na camada de 5-10 cm, com cultivo de mucuna-cinza e de feijão-de-porco (78 e 76 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>, respectivamente, em comparação ao milheto, com 66 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>). Em relação aos demais atributos do solo foi possível evidenciar que o cultivo de mucuna-cinza favoreceu a acidificação do solo, enquanto a espécie feijão-de-porco levou ao aumento das bases trocáveis nas camadas superficiais. Sendo assim, no décimo oitavo ano de adoção do cultivo de plantas de cobertura em pré-safra de milho, com variação nas doses de N na cultura do milho, é possível evidenciar ganho na qualidade do solo com o cultivo das plantas de cobertura, independentemente se gramínea ou leguminosa. A adubação nitrogenada, por outro lado, tanto na sucessão gramínea-gramínea quanto na sucessão leguminosa-gramínea, não tem resultado em melhoria do solo, observando-se apenas efeitos de interação, em poucas situações, com as espécies de cobertura.

**Palavras-chave:** matéria orgânica, fertilidade do solo, carbono orgânico total, carbono orgânico solúvel.

## CHEMICAL ATTRIBUTES OF RED OXISOL IN FUNCTION OF COVER CROPS AND NITROGEN FERTILIZATION

**ABSTRACT** – The use of cover crops is one of the most economical sustainable practices to promote improvements in the physical, chemical and biological quality of the soil. The objective of this work was to evaluate the influence of cover crops cultivated previous to corn and topdressing N fertilization on the soil quality, in a long term experiment. The experiment was installed in the 2000/2001 in a clay Oxisol, and has been carried out since then (18 years) in a randomized block design with split plots and four replicates. The main treatments are: jack bean, millet, velvet bean gray and spontaneous vegetation (fallow). The secondary treatments are doses of N in topdressing in the corn culture (0, 60, 120 and 180 kg ha<sup>-1</sup> of N). Were evaluated total organic carbon, water-soluble organic carbon, calcium, magnesium and exchangeable potassium, and by calculation, were obtained the values of the sum of bases, the cation exchange capacity and base saturation, in soil samples collected at 0-5 cm, 5-10 cm and 10-20 cm deep. The cover plants provided higher content of total organic carbon compared to the fallow in the 0-5 and 5-10 cm layers. In these depths, in the average of species, total organic carbon increased in 3.51 g kg<sup>-1</sup> and 1.7 g kg<sup>-1</sup>, respectively. In the same layers, the average increase in water-soluble organic carbon due to the cover plants was of 130 mg kg<sup>-1</sup> and 68.4 mg kg<sup>-1</sup>, respectively. Despite the increase of total organic carbon in the two superficial layers, the cation exchange capacity increased only in the layer of 5-10 cm, with cultivation of velvet bean gray and jack bean (78 and 76 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>, respectively, compared to millet, with 66 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>). In relation to the other attributes of the soil, it was possible to show that the cultivation of velvet bean gray favored acidification of the soil, while a species of jack bean led to the increase of exchangeable bases on surface deeps. Thus, in the eighteenth year of adoption of the cover crop cultivated previous to corn, with variation in the N doses in the corn crop, it is possible to demonstrate a gain in soil quality with the cultivation of cover crops, regardless if it is grassy or legume. A nitrogen fertilization, on the other hand, both in grass-grass or legume-grass succession, has not resulted in soil improvement, observing only interaction effects, in a few situations, with cover species.

**Keywords:** organic matter, soil fertility, total organic carbon, soluble organic carbon.

## 1. INTRODUÇÃO

A intensa atividade agrícola e o manejo inadequado do solo podem diminuir suas reservas de carbono (C) orgânico e de nutrientes. Neste cenário, o cultivo de plantas de cobertura antes da cultura principal pode proteger o solo, adicionar o C orgânico perdido e reciclar nutrientes, melhorando a qualidade do solo. Manter o solo protegido com vegetação melhora sua qualidade física por reduzir o impacto das gotas de chuva, diminuir o escoamento superficial da água e os processos erosivos, além de minimizar problemas de compactação. Do ponto de vista da fertilidade do solo, a maior parte dos benefícios das espécies de cobertura está associada ao aumento dos estoques de C, com o qual estão vinculados aumentos nas reservas de N, P e outros nutrientes, aumento na CTC e diminuição na acidez por complexação do alumínio ( $Al^{3+}$ ) e manganês ( $Mn^{2+}$ ).

As espécies utilizadas como plantas de cobertura absorvem e armazenam, em sua fitomassa, nutrientes que estão em camadas mais profundas e que estão fora do alcance das raízes da cultura comercial. Quando cortadas ou dessecadas, liberam tais nutrientes durante a decomposição de seus tecidos, contribuindo com o aumento dos teores destes elementos nas camadas mais superficiais, nas quais se concentram as raízes da cultura comercial. Isso aumenta a eficiência de uso de corretivos e fertilizantes, o que contribui para o aumento de produtividade das próximas culturas (Forte et al., 2018).

Além de aumentar o teor de carbono orgânico total do solo, o cultivo de plantas de cobertura pode interferir em outras frações que o compõe, entre as quais destaca-se o C extraível ou solúvel em água quente (COS). Trata-se de uma fração pequena, mas muito importante, porque contém uma reserva de nutrientes de liberação rápida.

Outro fator que pode alterar a quantidade e o ciclo de C orgânico no solo é a entrada de N via adubação, uma vez que proporciona maior desenvolvimento vegetativo e maior atividade fotossintética da planta, assimilando  $CO_2$  e armazenando outras formas de C em sua fitomassa. Tal fato pode resultar em impactos ambientais significativos, incorporando C ao solo e diminuindo sua concentração na atmosfera, o que torna os estudos sobre o efeito da adição de N no

teor de C do solo extremamente necessários (Chen et al., 2013). Efeitos da adubação nitrogenada nos teores de C do solo já foram relatados, desde positivos (Graaff et al., 2006), até negativos (Janssens et al., 2010) ou nulos (Liljeroth et al., 1994). Contudo, os resultados citados foram obtidos em solos de clima temperado, havendo uma lacuna científica sobre o papel do N no acúmulo de COT e de COS em condições tropicais.

A utilização de plantas de cobertura e de adubação nitrogenada pode aumentar o estoque e alterar a composição do C orgânico no solo, influenciando diretamente sua fertilidade. Nessas alterações, são originadas substâncias estáveis e com propriedades coloidais (Han et al., 2016), aumentando a CTC do solo. Assim, tanto o cultivo de plantas de cobertura quanto a adubação nitrogenada em solos de zonas tropicais, ricos em minerais de argila de baixa atividade e óxidos de ferro e alumínio, têm no aumento da CTC um dos principais benefícios.

Diante disso, o objetivo com este trabalho foi avaliar o efeito do cultivo de espécies de plantas de cobertura em pré-safra a cultura do milho e da adubação nitrogenada em cobertura no milho na qualidade do solo em experimento de longa duração.

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1. Plantas de cobertura e adubação verde**

Com a intensificação da exploração agrícola, um dos principais riscos é a degradação dos solos. Na busca por preservar a qualidade do solo mesmo em ambientes de alta produtividade e intensa exploração dos recursos naturais, várias estratégias de manejo conservacionista vêm sendo propostas, e em muitas delas, o cultivo de plantas de cobertura é indicado em consórcio ou sucessão à cultura principal. Com o cultivo das plantas de cobertura é possível melhorar ou manter a qualidade física, química e biológica do solo, garantindo aumento de produtividade (Lima Filho et al., 2014).

Plantas de cobertura reduzem a erosão hídrica por dissipar a energia das gotas de chuva, diminuindo a desagregação e o selamento superficial (Bressan et al., 2013), além de aumentar a porosidade e diminuir a densidade do solo (Silva et

al. 2017), promovendo aumento da infiltração e da capacidade de armazenamento de água (Steenwerth e Belina, 2008; Muñoz-Carpena et al., 2008). Já o efeito da planta de cobertura na qualidade química do solo depende de fatores como a espécie utilizada, o próprio solo, as condições climáticas e o manejo (Andreola et al., 2000; Osterroht, 2002). Todavia, sabe-se que elas apresentam influência na fertilidade do solo por aumentar o teor de matéria orgânica (MO), a capacidade de troca de cátions (CTC) e o teor de fósforo (P) disponível, além de diminuir a acidez, adicionar nitrogênio (N) ao sistema por meio da fixação biológica (no caso de leguminosas fixadoras) e disponibilizar micronutrientes (Osterroht, 2002).

Um dos principais desafios em solos de clima tropical é identificar uma espécie de planta de cobertura que melhore a fertilidade do solo e ao mesmo tempo promova aporte de MO e proteção física, pois a manutenção da cobertura vegetal sobre o solo é dificultada devido às condições climáticas que favorecem a rápida decomposição (Silva et al., 2017). As leguminosas (família Fabaceae) são plantas denominadas de adubos verdes por proporcionarem incremento de N no solo por meio da fixação biológica, possibilitando a redução ou até mesmo a não utilização de adubos nitrogenados. As gramíneas (família Poaceae) também são utilizadas com a finalidade de proteger e melhorar a qualidade do solo, todavia, não fazem fixação biológica de nitrogênio, sendo assim denominadas de plantas de cobertura (Lima Filho et al., 2014).

Fabáceas produzem fitomassa com relação carbono/nitrogênio (C/N) em torno de 20/1, o que favorece a decomposição e mineralização, podendo disponibilizar nutrientes mais rapidamente para a cultura subsequente. Estima-se que a liberação de N ocorre nos primeiros 60 dias após a incorporação do resíduo, sendo possível realizar a semeadura da cultura principal imediatamente. Entretanto, dependendo das condições, tal característica pode favorecer a lixiviação de nitrato e produzir pequenas quantidades de húmus. As espécies de poáceas, por sua vez, apresentam maior concentração de lignina e maior relação C/N (acima de 30/1), decompondo mais lentamente, o que confere a elas maior potencial formador de MO no solo. Entretanto, a utilização destas espécies pode promover competição por N-mineral entre microrganismos e plantas, ocasionando deficiência temporária deste elemento (Lima Filho et al., 2014).

Desta forma, a disponibilização de nutrientes ou proteção física do solo vai depender da espécie de planta, da resistência do resíduo vegetal à decomposição, da temperatura, da umidade, do manejo e da fertilidade do solo, sendo que, em condições de maior temperatura, umidade e aeração, a decomposição é acelerada.

Entre as espécies usadas como plantas de cobertura, algumas já foram mais estudadas e são aceitas como adequadas para grande parte do território brasileiro, como as mucunas, o feijão-de-porco, as crotalárias e o milho. Para adequação da espécie ao sistema de produção em que será incluída é necessário conhecer suas características de crescimento e exigências.

### **2.1.1. Feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis* L.)**

É uma espécie anual da família Fabaceae, de porte ereto e herbáceo, com crescimento inicial lento, resistência à temperaturas elevadas, tolerância ao sombreamento parcial e adaptada a solos com teores baixos de P. Apresenta hastes grossas e lenhosas, de 80 a 120 cm de altura, com florescimento de 80 a 90 dias e de 130 a 140 dias até a colheita. Apresenta sistema radicular bem desenvolvido, o que lhe confere resistência a veranicos, capacidade de fixar nitrogênio variando de 57 a 190 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, e produção de 20 a 25 t ha<sup>-1</sup> de fitomassa verde e 5 a 8 t ha<sup>-1</sup> de fitomassa seca.

O feijão-de-porco apresenta efeito alelopático sobre a tiririca, podendo ser cultivado em cafezais, pomares e em consócio com o milho. Apresenta a desvantagem de ser hospedeiro de nematoides-de-galhas (*Meloidogyne incognita* e *Meloidogyne javanica*) e mosca-branca (*Bemisia tabaci*), a qual é vetora do vírus-do-mosaico-dourado, devendo ser evitada em áreas que apresentam incidência destes nematoides e vetores (Lima Filho et al., 2014).

### **2.1.2. Mucuna-cinza (*Mucuna nivea*)**

Da família Fabaceae, é uma planta considerada “melhoradora” do solo, rústica, com elevada capacidade de fixação de N, que varia entre 170 e 219 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> (Derpsch e Calegari, 1992; Wutke, 1993), e muito eficiente na ciclagem de nutrientes. Apresenta crescimento rápido, promovendo cobertura do solo e controle de plantas daninhas. Produz de 18 a 30 t ha<sup>-1</sup> de fitomassa verde e de 3 a 6 t ha<sup>-1</sup> de

fitomassa seca. É considerada má hospedeira dos nematoides de galhas (Wutke, 1993) e também do nematoide do cisto (*Heterodera* spp.) (Lima Filho et al., 2014).

### **2.1.3. Milheto (*Pennisetum glaucum* L.)**

Da família Poaceae, é uma forrageira anual de clima tropical, com crescimento ereto, rústica, adaptada a solos de baixa fertilidade, apresentando tolerância mediana ao  $Al^{3+}$ . É muito utilizada na safrina em áreas de Cerrado, após a colheita de milho, algodão ou soja. Na região Sul, é utilizada como cobertura do solo no sistema de plantio direto (SPD). Sua altura varia de 4 a 5 m no cultivo de verão e de 1,5 a 2 m na safrinha. Apresenta a vantagem de não ser hospedeira de pragas de importância econômica, todavia, deve-se ficar atento quando o milho é cultivado em seguida, pois foi constatado que o milheto pode ser atacado pela largata-dos-capinzais (*Mocis latipes*), a qual é praga de ambos.

Essa forrageira apresenta crescimento rápido e sistema radicular vigoroso, grande perfilhamento, com potencial para ciclagem de nutrientes e redução de patógenos no solo. Produz cerca de 10 t ha<sup>-1</sup> de matéria seca e a época de semeadura considerada mais adequada vai de outubro a novembro (Lima Filho et al., 2014).

## **2.2. Influência das plantas de cobertura e da adubação nitrogenada na qualidade química do solo**

A definição de qualidade do solo ainda é muito subjetiva e depende do objetivo do usuário ou da função do ecossistema em que ele está inserido, influenciando na escolha dos indicadores mais adequados (Bouma, 2002).

Agronomicamente, os indicadores de qualidade do solo (IQS) devem ser de fácil determinação (Weil e Magdoff, 2004), sazonalmente estáveis e sensíveis ao manejo (Silveira, 2005; Lourente et al., 2016; Rakkar et al., 2017; Viaud et al., 2018). Eles podem ser físicos (estrutura, densidade do solo, compactação, resistência do solo à penetração das raízes etc.), químicos (pH, matéria orgânica, salinidade, cátions trocáveis, capacidade de troca de cátions etc.) e biológicos (atividade enzimática, biomassa e atividade microbiana).

Os indicadores mais facilmente determinados e relacionados diretamente com a fertilidade do solo são: matéria orgânica do solo (MOS), pH e cátions trocáveis. O

carbono orgânico solúvel (COS) não é empregado em análise de rotina, mas é um indicador importante por ser facilmente alterado pelo manejo e estar intimamente relacionado com o fornecimento de nutriente para plantas e energia para os microrganismos.

Diante disso, as plantas de cobertura podem contribuir para melhorar a qualidade química do solo por minimizar as perdas de MOS, além de aumentar o teor de C e a ciclagem de nutrientes no solo ao longo dos anos (Ribeiro, 2016). Ainda, associadas à adubação nitrogenada pode-se obter maior produção de fitomassa (Mateus et al., 2012; Lima et al., 2016) e maior proteção física do solo. Além disso, os resíduos das plantas de cobertura alteram os ciclos dos nutrientes por meio de interferências nos processos de mineralização e imobilização, os quais dependem da relação C/N, e dos teores de lignina, celulose e hemicelulose (Diekow et al., 2005; Carvalho et al., 2012; Veras et al., 2016). Assim, plantas de cobertura podem afetar diretamente os indicadores químicos de qualidade do solo.

A utilização de plantas de cobertura tem potencial para aumentar o teor de MOS, influenciando diretamente a fertilidade, principalmente a capacidade de troca de cátions (CTC) e a disponibilidade de nutrientes. A decomposição dos resíduos das plantas de cobertura pode aumentar os teores de cálcio ( $\text{Ca}^{+2}$ ), magnésio ( $\text{Mg}^{2+}$ ) e potássio ( $\text{K}^{+}$ ) do solo. A liberação dos cátions ocorre na solução do solo, o que pode diminuir a atividade do alumínio ( $\text{Al}^{3+}$ ) (Miyazawa et al., 1993; Franchini et al., 1999; Ciotta et al., 2002; Diehl et al., 2008). Assim, vários atributos, indicadores da qualidade química do solo podem ser alterados após o cultivo de plantas de cobertura.

### **2.2.1. Matéria orgânica do solo**

A matéria orgânica do solo (MOS) é composta de tecidos de natureza animal e vegetal em diversos estágios de decomposição (Lehmann e Kleber, 2015), além de células microbianas e outras moléculas que são sintetizadas simultaneamente (Brady e Weil, 2013). Um dos principais desafios em descobrir a origem e a via de produção de uma substância da MOS está no fato de que os microrganismos decompõem determinadas moléculas, mas também as produzem, dificultando a identificação dos compostos resultantes de degradação e os resultantes de síntese. Além disso, em função do substrato de origem, há uma mistura de várias moléculas

que diferem na resistência à decomposição, fazendo com que algumas sejam acumuladas e outras tenham pouco tempo de permanência no solo.

A MOS é constituída principalmente de C, pois as plantas fixam C-CO<sub>2</sub> da atmosfera e produzem compostos como amido, hemicelulose, celulose, ligninas, proteínas, ácidos nucleicos, entre outros, os quais chegam ao solo por meio dos seus resíduos, que posteriormente são utilizados pelos microrganismos como fonte de C, energia e nutrientes (Pulrolnik, 2009). Desta forma, o destino inicial do C do resíduo é a biomassa microbiana. Posteriormente, parte será convertida em formas mais estáveis de C no solo e cerca de 2/3 do C serão perdidos para a atmosfera na forma de CO<sub>2</sub> (Moreira e Siqueira, 2006).

No processo de síntese da MOS ocorre a formação das substâncias não húmicas e das substâncias húmicas. As substâncias não húmicas são constituídas de carboidratos, gorduras, ceras e proteínas, representando de 10 a 15% da MOS (Pinheiro et al., 2004; Nascimento et al., 2010), pois são facilmente degradadas. As substâncias húmicas são compostos coloidais estáveis e de difícil degradação, persistindo no solo por mais tempo (Han et al., 2016), e constituindo cerca de 80 a 90% da MOS (Pinheiro et al., 2004; Nascimento et al., 2010).

As substâncias húmicas são representadas pelas frações ácidos fúlvicos (AF), ácidos húmicos (AH) e huminas (HU) (Mendonça e Matos, 2005). Os ácidos fúlvicos são compostos de maior solubilidade por apresentarem maior polaridade e menor tamanho molecular, responsáveis por mecanismos de transporte de cátions no solo. Os ácidos húmicos apresentam solubilidade baixa nas condições de acidez normalmente encontradas em solos tropicais, sendo responsáveis pela maior parte da CTC presente em coloides orgânicos, nas camadas superficiais. A humina, apesar de apresentar baixa reatividade, é responsável pela agregação das partículas e, na maioria dos solos tropicais, representa boa parte do C humificado (Benites et al., 2003). O C da MOS pode estar livre ou fracamente associado às partículas do solo (C-orgânico particulado), mas também pode estar fortemente ligado às partículas minerais, formando complexos organo-minerais (COam) (Gazolla et al., 2015).

Mesmo sendo um indicador de qualidade do solo, a alteração no teor de carbono orgânico total (COT) não é detectada em curto espaço de tempo (Oliveira et

al., 2018). Tal fato se deve a sua variabilidade na área, sendo necessário estudo das diferentes frações que compõem a MOS (Baldotto e Baldotto, 2014). As frações de C-orgânico do solo apresentam diferentes graus de oxidação, as quais auxiliam no estudo da dinâmica da MOS (Oliveira et al., 2018) e permitem o entendimento das características que poderão ser utilizadas como indicadoras de qualidade do solo ao longo do tempo (Rosset et al., 2016).

O C orgânico acumula no solo em frações lábeis e não-lábeis (estáveis), as quais comandam os efeitos da MOS e sua permanência no solo (Ribeiro et al., 2011). A fração humificada da MOS atua em características químicas e físicas do solo, além de contribuir no sequestro de C atmosférico (Silva e Mendonça, 2007). A fração lábil, por sua vez, é facilmente degradada em curto período e, quando mineralizada, tem a função de fornecer nutrientes para as plantas, além de energia e C para os microrganismos (Silva et al., 2011).

Desta forma, o C lábil é um dos indicadores utilizados para avaliar o impacto do manejo do solo em curto prazo (Silva et al., 2011), sendo definido como constituinte de compostos orgânicos com maior facilidade de mineralização pelos microrganismos do solo (Rangel et al., 2008). Dentro desta fração, está incluso o carbono orgânico solúvel em água, ou carbono orgânico dissolvido, o carbono da biomassa microbiana e o carbono oxidável por permanganato de potássio (Blair et al., 1995; Purakayastha et al., 2008; Plaza-Bonilla et al., 2014).

A quantidade de matéria orgânica ou carbono orgânico do solo é função da taxa de entrada de material orgânico e da sua velocidade de decomposição. Quando se tem o cultivo de culturas anuais ou plantas de cobertura em sistema de semeadura direta a tendência é aumentar o teor de CO, pois a taxa de entrada é maior que a velocidade de decomposição (Brown e Dickey, 1970). Desta forma, o cultivo de plantas de cobertura em rotação com a cultura comercial pode melhorar a qualidade do solo por aumentar o estoque de carbono (RIBEIRO et al., 2011; ROSOLEM e CALONEGO, 2013). Outro fator que pode aumentar a produção de matéria seca e conseqüentemente o teor de CO é a adubação, como observado por Liang e Mackenzie (1992) após o cultivo de milho durante 6 anos com fertilização mineral em altas doses.

### 2.2.2. Carbono orgânico solúvel em água (COS)

Uma das formas lábeis do C da matéria orgânica do solo (MOS) é o carbono orgânico solúvel em água (COS), fração do carbono orgânico total do solo (COT) prontamente disponível para decomposição, que tem mostrado maior sensibilidade às mudanças provocadas pelo manejo do que a MOS com um todo (Silveira, 2005).

Além de estar envolvido com a disponibilidade de nutrientes para as plantas e microrganismos, o COS representa o que está em equilíbrio entre as partes adsorvidas e dissolvidas e está relacionado com atividade microbiana (Silveira, 2005). É a fração mais móvel da MOS (Smebye et al., 2015), o que interfere no transporte e biodisponibilidade de poluentes metálicos e orgânicos (Zsolnay, 1996), que são perdidos por lixiviação, o que pode causar impactos ambientais significativos (Silva et al., 2014).

As principais fontes de COS no solo são a serapilheira, o húmus, os exsudatos radiculares e a biomassa microbiana. O COS é definido como o conjunto de substâncias orgânicas menores que 0,45  $\mu\text{m}$ , distribuídas em diferentes tamanhos de poros e estruturas (Kalbitz et al., 2000). Segundo Zsolnay (1996), o COS pode ser classificado em matéria orgânica dissolvida (MOD) I, II e III, sendo a primeira fração a que está protegida pelos microagregados e não é biodisponível, mas se exposta pelo revolvimento do solo pode ser utilizada como fonte de energia para os microrganismos. A MOD II está retida nos mesoagregados, sendo uma fração intermediária entre a MOD I e a III. A MOD III é encontrada em macroagregados e é facilmente metabolizada pelos microrganismos.

Mesmo sendo uma pequena fração do COT, o COS afeta diretamente a física, a química e a biologia do solo, sendo fonte primária de N, P e S mineralizável (Haynes, 2000) e fonte de C móvel para microrganismos. Kalbitz et al. (2000) afirmam que 10 a 40% do COS pode ser facilmente decomposto por microrganismos em dias ou meses, sendo muito difícil mensurar a degradação microbiana devido às reações de adsorção que protegem o COS.

Como mencionado, o COS não é composto somente de C, mas também de N, P e metais, contribuindo para o equilíbrio desses elementos no solo (Qualls e Richardson, 2003). Desta forma, o conhecimento do COS é importante para o manejo sustentável dos agroecossistemas, pois pode influenciar a ciclagem de

nutrientes em ambientes aquáticos e terrestres. Todavia, os fatores que controlam a biodisponibilidade de COS são pouco conhecidos e como ele contém compostos que são fontes de N e P mineralizáveis, a disponibilidade desses nutrientes pode ser alterada simultaneamente com as mudanças no COS do solo (Silveira, 2005). Assim, esta forma de C facilmente mineralizável possui em suas moléculas outros elementos que podem ser nutrientes e, quando submetida a decomposição e mineralização, pode disponibilizá-los para as plantas e microrganismos.

### **2.2.3. Efeitos da adubação nitrogenada nos atributos químicos do solo**

A utilização de fontes industriais de N na agricultura causa alterações importantes no ambiente agrícola como a acidificação do solo, seja por meio da remoção de bases ou da geração de íons hidrogênio no solo. Além disso, o N apresenta influência no ciclo do C do solo (Janssens et al., 2010), pois aumenta o crescimento vegetativo e a assimilação de CO<sub>2</sub> atmosférico, fenômeno de extrema importância por aumentar o teor de C do solo e diminuir sua concentração na atmosfera na forma de gás de efeito estufa (Manlay et al., 2007). Desta forma, são necessários estudos sobre o efeito da adição de N na decomposição dos resíduos e da própria MOS, além do efeito direto no estoque de C do solo (Chen et al., 2013).

A adubação nitrogenada pode estimular a atividade microbiana e favorecer a decomposição da MOS, fenômeno conhecido como efeito *priming*. A decomposição da MOS afeta a mineralização de nutrientes ligados ao C, aumentando as quantidades que serão disponibilizadas às plantas ou assimiladas por microrganismos (Halisk, 2015).

Existem hipóteses sobre os mecanismos precursores do efeito *priming* como, “decomposição estequiométrica” e “mineralização de N microbiano” (Craine et al., 2007). De acordo com a teoria de decomposição estequiométrica a atividade microbiana é maior se a quantidade de nutrientes (C e N) adicionada corresponder a demanda dos microrganismos e, desta forma, a taxa de decomposição será máxima (Hessen et al., 2004). Assim, as razões de entrada de C e N devem ser estequiométricas, ou seja, a quantidade de N adequada para certa quantidade de C, sendo que, de maneira geral, a relação C/N requerida pelos microrganismos do solo é de 30/1. Na teoria da mineralização de N microbiano admite-se que, ao

assimilarem N, os microrganismos utilizam o C lábil como fonte de energia e quando o reservatório de N para os microrganismos é pequeno, ocorre ataque e decomposição da MO estável para supri-lo (Moorhead e Sinsabaugh, 2006). Desta forma, dependendo das condições, a adubação nitrogenada pode contribuir para reduzir o teor de MOS.

Além disso, em sistemas agrícolas, quando o nitrogênio é aplicado na forma amoniacal ( $\text{NH}_4^+$ ), é rapidamente convertido em nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) por bactérias autotróficas do solo (nitrificação), ocorrendo a produção de íons de hidrogênio ( $\text{H}^+$ ) que contribuem significativamente para acidificação do solo (Raj, 2011). Ainda, na forma de  $\text{N-NO}_3^-$ , ânion com baixa afinidade com os coloides, o N fica na solução do solo e forma par iônico com cátions que podem ser nutrientes de plantas, favorecendo a lixiviação. Quando ocorre remoção de bases por meio da lixiviação com o  $\text{NO}_3^-$  ou mesmo pela colheita, há acidificação. Aos processos de perda de bases somam-se as entradas de  $\text{H}^+$  que é originado da nitrificação, da dissolução do  $\text{CO}_2$  e da liberação de exsudatos radiculares (Quaggio, 1986; Sharma et al., 2011). A acidificação do solo interfere diretamente na disponibilidade de nutrientes para as plantas por alterar suas formas químicas, além de contribuir para presença de elementos em formas solúveis e tóxicas, como alumínio ( $\text{Al}^{3+}$ ) e manganês ( $\text{Mn}^{2+}$ ) (Souza et al., 2007). Desta forma, deve-se adotar o manejo adequado para minimizar os efeitos negativos da nitrificação.

Os efeitos positivos da adubação nitrogenada no milho podem refletir no aumento da concentração de nitrogênio no solo para a cultura subsequente, como as plantas de cobertura, devido ao efeito residual do fertilizante, que embora seja pequeno, pode existir. Com isso, há maior crescimento vegetativo e produção de matéria seca (Galindo et al., 2018), maior atividade fotossintética e fixação de C- $\text{CO}_2$ , o qual é transformado em C-orgânico e depositado sobre o solo por meio dos restos culturais.

Assim, o cultivo de plantas de cobertura em pré-safra a cultura do milho e a adubação nitrogenada podem apresentar sinergismo para aumento do teor de C orgânico do solo, com potencial para aumentar a produtividade e consequentemente, a entrada de C no sistema. Por isso, o conhecimento do efeito do cultivo de plantas de cobertura, adubação nitrogenada e da interação de ambas

no conteúdo e na qualidade da MOS, bem como em outros atributos químicos do solo, é de extrema importância.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1. Localização, solo, clima e histórico

O experimento está instalado na área experimental da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV/Unesp), câmpus Jaboticabal-SP a 21°15'22" de latitude Sul e 48°16'43" de longitude Oeste, com altitude de 595 m. O clima local é tropical úmido com estiagem no inverno, classificado como Aw pelo Sistema Internacional de Classificação de Koppen. A precipitação pluvial anual média é de 1.285 mm e a temperatura média é 22,4 °C, sendo as médias das máximas e das mínimas de 24,5 e 18,8 °C, respectivamente. O solo do local 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 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

Na safra 1998/1999 a área do experimento passou a ser cultivada em semeadura direta e no segundo semestre de 2000 iniciou-se o experimento cultivando plantas de cobertura em pré-safra a cultura do milho, o qual vem sendo adotado desde então. Em todos os anos as plantas de cobertura foram semeadas em setembro ou outubro (dependendo da primeira chuva), dessecadas em dezembro ou janeiro e, logo em seguida, é realizada a semeadura do milho. Entre a colheita do milho e a próxima semeadura das plantas de cobertura a área fica em

pousio. Na safra 2003/2004 não foi possível cultivar as plantas de cobertura devido ao atraso no início das chuvas.

### **3.2. Delineamento experimental e tratamentos na safra 2018/2019**

O delineamento do experimento é em blocos casualizados com parcelas subdivididas e quatro repetições. Nas parcelas são cultivadas as plantas de cobertura: crotalária (*Crotalaria juncea*), feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis*), lablab (*Dolichos lablab* L.), milheto (*Pennisetum americanum*), mucuna-cinza (*Mucuna cinerea*) e vegetação espontânea (pousio). Nas subparcelas têm-se quatro doses de nitrogênio (N) em cobertura na cultura do milho (0, 60, 120 e 180 kg ha<sup>-1</sup> de N). As parcelas apresentam área total de 126 m<sup>2</sup> (18 m x 7 m) e as subparcelas de 31,5 m<sup>2</sup> (4,5 m x 7 m).

No presente trabalho foram avaliadas somente as parcelas com as plantas mucuna-cinza, feijão-de-porco, milheto e pousio, combinadas com as quatro doses de N. No tratamento pousio, a vegetação espontânea desde o início do experimento foi composta de picão-preto (*Eupatorium ballataefolium*), corda-de-viola (*Ipomoea* sp.), guanxuma (*Sida spinosa*), carrapicho-de-carneiro (*Acanthospermum hispidum*), fedegoso (*Senna occidentalis*), capim-colchão (*Digitaria horizontalis*) e leiteiro (*Euphorbia heterophylla*). As espécies predominantes na safra 2018/2019 foram o capim-amargoso (*Digitaria insularis*) e a buva (*Conyza bonariensis*).

As plantas de cobertura foram semeadas no início de outubro de 2018, sem adubação, com espaçamento de 0,50 m nas entrelinhas, e a quantidade de sementes por metro linear foi de 9, 8 e 20 para mucuna-cinza, feijão-de-porco e milheto, respectivamente.

### **3.3. Amostragem de solo e atributos avaliados**

As amostras de solo foram coletadas 20 dias após a semeadura das plantas de cobertura, nas profundidades 0-5, 5-10 e 10-20 cm, na safra 2018/2019 (início do 18º ciclo). Para a obtenção da amostra composta foram coletadas em cada subparcela 10 subamostras nas entrelinhas da cultura, no caso das espécies cultivadas, e ao acaso, nas parcelas com vegetação espontânea. As amostras foram embaladas e levadas para o Laboratório de Fertilidade do Solo da Faculdade de

Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV/Unesp), câmpus de Jaboticabal-SP, onde foram secas ao ar e passadas em peneira de malha de 2 mm.

Os atributos avaliados foram:

**a) carbono orgânico total (COT):** determinado por oxidação via úmida ( $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 + \text{H}_2\text{SO}_4$ ) e quantificação colorimétrica (Dakota do Sul modificado) conforme descrito em Raij et al. (2001). Transferiram-se 1 g de solo e 10 mL de solução de dicromato de sódio em ácido sulfúrico ( $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 + \text{H}_2\text{SO}_4$ ) para frasco de 100 mL. A mistura foi agitada durante 10 min em agitador circular horizontal a 240 rpm. Após uma hora, foram adicionados 50 mL de água desionizada e a suspensão ficou em repouso por uma noite. Passado este período, uma alíquota do sobrenadante foi transferida para cela de medida no espectrofotômetro e a leitura foi feita no comprimento de onda de 650 nm. Os resultados foram calculados a partir de uma curva padrão obtida com solos analisados pelo método de Walkley e Black. Os dados foram transformados em carbono orgânico total (COT) levando em consideração que cerca de 58% da MOS é composta de C.

**b) carbono orgânico solúvel em água (COS):** esta variável foi determinada seguindo o método de Sparling et al. (1998). Foram usados tubos de centrífuga de 50 mL, para os quais foram transferidos 2 g de solo e 20 mL de água desionizada. A suspensão foi mantida em banho-maria a 70°C por 18 horas, com os tubos fechados com filme de plástico para limitar a perda de água. A suspensão foi então centrifugada por 10 min a 8.000 rpm e 10 mL do sobrenadante foram transferidos para erlenmeyers de 125 mL, aos quais foram adicionados 1 mL de solução de dicromato de potássio ( $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  0,0835 mol L<sup>-1</sup>) e 2 mL de ácido sulfúrico concentrado ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). As amostras foram mantidas em chapa aquecedora por 30 min a 140 °C e, para evitar redução de volume, foi colocado um funil pequeno na boca de cada erlenmeyer. Após resfriamento do extrato foi feita adição de 20 mL de água desionizada e 1 mL de ácido fosfórico concentrado ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ), prosseguindo com titulação utilizando solução de sulfato ferroso amoniacal [ $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  0,0125 mol L<sup>-1</sup>], após adição de 3 gotas de difenilamina 10 g L<sup>-1</sup> como indicador.

**c) pH em solução de cloreto de cálcio ( $\text{CaCl}_2$  0,01 mol L<sup>-1</sup>) e acidez total (H+Al):** estas determinações foram feitas segundo Raij et al. (2001). Para copo de plástico apropriado foram transferidos 10 cm<sup>3</sup> de solo e 25 mL de solução de  $\text{CaCl}_2$

0,01 mol L<sup>-1</sup>. A suspensão foi agitada por 10 min a 220 rpm e após 30 min de repouso foi feita leitura de pH. Logo em sequência, a mesma amostra recebeu 5 mL de solução tampão SMP e foi submetida a agitação por 15 min, mais repouso por uma hora. Em seguida foi feita a leitura do pH da solução SMP após o equilíbrio com o solo. A conversão do valor de pH SMP em acidez total (H+Al) foi feita usando curva padrão obtida com conjunto de solos analisados pelo método de referência para H+Al, no qual se emprega solução de acetato de cálcio 0,5 mol L<sup>-1</sup> como extrator, e os respectivos valores de pH<sub>SMP</sub>

**d) cálcio (Ca<sup>2+</sup>), magnésio (Mg<sup>2+</sup>) e potássio (K<sup>+</sup>) trocáveis:** A descrição completa do procedimento está em Raij et al. (2001). Foram usados 5 cm<sup>3</sup> de solo e 50 mL de solução de cloreto de amônio (NH<sub>4</sub>Cl 1 mol L<sup>-1</sup>), os quais foram transferidos para frascos de plástico. A suspensão foi agitada por 5 min a 240 rpm e depois mantida em repouso por uma noite. Para determinação de Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup> foi pipetado 1 mL do extrato e transferido para recipiente de 50 mL, sendo adicionados 24 mL de solução de La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 1 g L<sup>-1</sup> de La para quantificação por espectrofotometria de absorção atômica. A determinação de K<sup>+</sup> foi feita pipetando 5 mL do extrato, os quais foram transferidos para recipientes de plástico, diluídos com 10 mL de água desionizada e submetidos à leitura diretamente no fotômetro de chama.

**e) soma de bases (SB), CTC a pH 7,0 e saturação por bases (V%):** foram obtidas por cálculo, utilizando os valores de acidez total (H+Al) e K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup> trocáveis.

### **3.4. Análise estatística**

Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA). Quando o valor de F foi significativo para efeito de plantas de cobertura as médias foram comparadas por meio do teste de Tukey a 5% de probabilidade, e para avaliação dos efeitos das doses de N foi usada regressão polinomial.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Carbono orgânico total (COT)

Houve efeito de plantas de cobertura na concentração de carbono orgânico total do solo (COT) em todas as profundidades, mas não houve efeito de doses de N ou de interações (Tabela 2).

**Tabela 2.** Teor de carbono orgânico total (COT) em função de plantas de cobertura e de doses de nitrogênio nas profundidades de 0-5, 5-10 e 10-20 cm.

Plantas de Cobertura	Profundidade		
	0 a 5 cm	5 a 10 cm	10 a 20 cm
	----- g kg <sup>-1</sup> -----		
Pousio	13,3 c	9,9 c	8,3 ab
Mucuna-cinza	18,3 a	12,3 a	8,9 a
Feijão-de-porco	16,2 b	11,6 ab	8,2 ab
Milheto	16,0 b	11,0 b	8,1 b
CV	9,07%	8,47%	8,35%
-----			
Doses de N (kg ha <sup>-1</sup> )			
0	16,4	11,2	8,4
60	16,3	11,4	8,2
120	16,1	11,2	8,4
180	15,1	11,0	8,5
CV	8,76%	8,18%	10,77%
----- Teste F -----			
Blocos	9,38**	15,93**	7,93**
Plantas de cobertura	31,86**	17,85**	4,46*
Doses de N	2,56ns	0,73ns	0,20ns
Interação	1,43ns	1,09ns	0,52ns

CV: coeficiente de variação; \*\*, \* e ns significativo a 1%, 5% e não significativo, respectivamente. Médias com letras iguais na coluna não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Observa-se que na profundidade de 0-5 cm o cultivo de mucuna-cinza resultou em maior teor de COT, seguido do cultivo de feijão-de-porco e milho, que foram semelhantes entre si, mas apresentaram teores maiores do que o pousio. Nas camadas mais profundas, a mucuna continuou sendo a espécie mais eficiente em promover acúmulo de C, mas nestes casos sem diferir do feijão-de-porco em 5-10 cm e do feijão-de-porco e pousio em 10-20 cm (Tabela 2).

Ao comparar os tratamentos com cultivo de plantas de cobertura e o pousio observa-se aumento no teor de COT de  $5 \text{ g kg}^{-1}$  e  $2,35 \text{ g kg}^{-1}$  nas profundidades de 0-5 e 5-10 cm, respectivamente. Tal fato demonstra a importância da escolha da espécie que proporciona a melhor cobertura do solo e permite ganho de qualidade nos atributos químicos, físicos e biológicos (Rosa et al., 2017).

O aumento no COT que foi observado deveu-se ao fato das plantas de cobertura promoverem a entrada de massa vegetal adicional, rica em C orgânico. Espécies de cobertura cultivadas em condições favoráveis apresentam desenvolvimento vegetativo maior e mais rápido, com atividade fotossintética alta e, conseqüentemente, elevada fixação de C-CO<sub>2</sub> em moléculas orgânicas. Parte do carbono fixado e incorporado no tecido vegetal foi, por ocasião da dessecação, depositado sobre o solo, no caso da parte aérea, e mantido dentro do solo, no caso das raízes, fornecendo substrato abundante para a formação da MOS, particularmente nos primeiros centímetros do solo, como foi observado (Tabela 2). Resultados semelhantes foram relatados por Michelin et al. (2019), os quais, avaliando a qualidade química do solo cultivado com as plantas de cobertura ervilhaca, aveia-preta, tremoço-azul, nabo-forrageiro, azevém e ervilha-forrageira cultivadas isoladamente, antecedendo a cultura do milho, identificaram que houve aumento no teor de MOS após três anos de cultivo.

Comparando as médias gerais (Tabela 2), somente a mucuna-cinza proporcionou maior teor de COT que o milheto na camada de 10-20 cm. Tal fato pode estar associado ao sistema de rotação, que inclui espécies de famílias diferentes.

Não foi feita comparação estatística entre profundidades, mas com o aumento da profundidade o teor de COT tendeu a diminuir, em decorrência do não revolvimento do solo e acúmulo de resíduos vegetais na superfície. O sistema de semeadura sobre a palhada tende a estratificar o COT de acordo com a profundidade, enquanto o sistema convencional promove distribuição mais uniforme nas camadas do solo devido ao revolvimento (Souza et al., 2016). Ensimas et al. (2016) também comentaram que o maior acúmulo de carbono na superfície do solo em sistema de plantio direto, em que o revolvimento ocorre somente na linha de semeadura, está associado a maior deposição de resíduos vegetais sobre o solo.

#### 4.2. Carbono orgânico solúvel (COS)

O teor de carbono orgânico solúvel (COS) foi influenciado pelas plantas de cobertura nas profundidades de 0-5 e 5-10 cm, mas não houve efeito de doses de N e das interações nestas duas profundidades (Tabela 3). Na profundidade de 10-20 cm houve somente efeito de interação, todavia, não houve ajuste de regressão e as médias foram comparadas pelo teste de Tukey (Tabela 4).

**Tabela 3.** Carbono orgânico solúvel em água (COS) em função de plantas de cobertura e de doses de nitrogênio nas profundidades de 0-5, 5-10 e 10-20 cm.

Plantas de Cobertura	Profundidade		
	0 a 5 cm	5 a 10 cm	10 a 20 cm
	----- mg kg <sup>-1</sup> -----		
Pousio	328,9 b	166,2 b	99,7
Mucuna-cinza	453,4 a	230,5 a	108,9
Feijão-de-porco	469,1 a	241,3 a	91,6
Milheto	451,5 a	232,1 a	102,7
CV	11,16%	19,11%	28,09%
----- Teste F -----			
Doses de N (kg ha <sup>-1</sup> )			
0	432,0	210,5	98,8
60	400,5	213,5	98,8
120	437,6	225,1	111,9
180	432,9	220,9	93,43
CV	16,52%	22,83%	27,43%
Blocos	5,01*	3,21ns	2,39ns
Plantas de cobertura	29,97**	11,04**	1,03ns
Doses de N	0,94ns	0,29ns	1,30ns
Interação	1,15ns	1,32ns	2,77*

CV: coeficiente de variação; \*\*, \* e ns significativo a 1%, 5% e não significativo, respectivamente. Médias com letras iguais na coluna não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Observa-se que as plantas de cobertura proporcionaram maior concentração de COS nas profundidades de 0-5 e 5-10 cm em comparação ao pousio, o que está associado ao maior acúmulo de COT nestas duas camadas. A influência das plantas de cobertura somente nas duas primeiras camadas do solo avaliadas está associada ao não revolvimento e, desta forma, o C lábil tende a acumular nas camadas superficiais devido ao aporte de resíduos vegetais sobre o solo (Leite et al., 2013).

**Tabela 4.** Desdobramento da interação entre plantas de cobertura e doses de nitrogênio para carbono orgânico solúvel em água (COS) na profundidade de 10-20 cm.

Doses de N (kg ha <sup>-1</sup> )	Plantas de cobertura			
	Pousio	Mucuna-cinza	Feijão de porco	Milheto
	----- mg kg <sup>-1</sup> -----			
0	97,8 aA <sup>1</sup>	95,0 bA	91,5 aA	111,0 aA
60	126,3 aA	76,8 bA	90,3 aA	101,8 aA
120	92,0 aB	164,0 aA	93,5 aB	98,3 aB
180	82,8 aA	100,0 bA	91,3 aA	99,8 aA

<sup>1</sup> Médias com letras minúsculas iguais na coluna e maiúsculas na linha não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Segundo Zhou et al. (2012), o reservatório de COS do solo cultivado com plantas de cobertura é originado da decomposição da MOS e de raízes dentro do solo. Assim, o aumento da entrada de C e N por meio da decomposição dos resíduos das plantas de cobertura resultaram no aumento de COS do solo em comparação ao pousio.

Na profundidade de 10-20 cm, na dose de 120 kg ha<sup>-1</sup> de N, o tratamento com mucuna-cinza apresentou maior concentração de COS (Tabela 4). Pode-se sugerir que nesta dose, a mucuna-cinza tem maior potencial para disponibilizar nutrientes que as demais plantas de cobertura, em função de sua decomposição ser facilitada por possuir menor relação C/N. Além disso, fabáceas podem produzir maior quantidade de ácidos fúlvicos (Rosa et al., 2017), os quais são mais solúveis e podem ser translocados para camadas mais profundas (Fontana et al., 2006; Han et al., 2016), contribuindo para maior quantidade de COS na profundidade de 10-20 cm. Ainda, a ureia (fonte de N utilizada no presente trabalho) aumentou o teor de carbono lábil do solo, conforme verificado por Faccin et al. (2016) em sistema de plantio direto. O aumento da quantidade de COS é importante para melhorar a disponibilidade de nutrientes e energia para as plantas e microrganismos, uma vez que esta forma de C está acompanhada de nutrientes facilmente mineralizáveis, podendo proporcionar aumento da produtividade das culturas (Bai et al., 2012; Chen, 2008; Curtin et al., 2006).

### 4.3. pH em CaCl<sub>2</sub> (0,01 mol L<sup>-1</sup>) e acidez total (H+Al)

Houve efeito de plantas de cobertura e de doses de N nos valores de pH em CaCl<sub>2</sub> e na acidez total (H+Al) nas profundidades de 0-5 e 5-10 cm. Na profundidade de 10-20 cm houve efeito somente de doses de N nestes dois atributos (Tabela 5).

**Tabela 5.** Valores de pH em CaCl<sub>2</sub> e acidez total (H+Al) em função das plantas de cobertura e de doses de nitrogênio nas profundidades de 0-5, 5-10 e 10-20 cm.

Plantas de Cobertura	Profundidade (cm)					
	0-5	5-10	10-20	0-5	5-10	10-20
	----- pH CaCl <sub>2</sub> -----			----- (H+Al) mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----		
Pousio	5,0 a	4,8 a	4,5	35,5 b	37,9 b	42,6
Mucuna	4,5 b	4,2 b	4,3	53,8 a	58,1 a	48,8
Feijão-de-porco	5,1 a	4,6 ab	4,5	37,4 b	45,2 b	42,6
Milheto	5,0 a	4,8 a	4,4	36,1 b	38,9 b	41,9
CV (%)	8,24%	8,93%	10,43%	23,53%	21,51%	20,94%
FV	Teste F					
Blocos	2,91ns	5,43*	1,68ns	1,36ns	1,75ns	0,26ns
Plantas de Cobertura	6,94*	7,83**	0,92ns	13,47**	14,82**	1,95ns
Doses de N	5,27**	8,27**	8,02**	6,57**	10,42**	3,67*
Interação	1,13ns	0,63ns	1,15ns	1,00ns	0,50ns	1,71ns

CV: coeficiente de variação; \*\*, \* e ns significativo a 1%, 5% e não significativo, respectivamente. Médias com letras iguais na coluna não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Observou-se que a planta de cobertura mucuna-cinza proporcionou menor valor de pH em CaCl<sub>2</sub> e maior valor de H+Al nas camadas superficiais (Tabela 5). Nas camadas de 0-5 e 5-10 cm a acidez está alta e muito alta, respectivamente, segundo o critério de interpretação de valores de pH em CaCl<sub>2</sub> (Raij et al., 1996). Plantas de cobertura podem modificar o pH da rizosfera por liberarem ácidos orgânicos (Espindola et al., 1997; Grayston et al., 1997). Ainda, como constatado por Caires et al. (2006), fabáceas podem provocar acidificação do solo, sendo que o feijão-de-porco também apresentou tendência em diminuir o valor de pH na profundidade de 5-10 cm no 18º ano de avaliação.

Com o cultivo da mucuna-cinza houve aumento de 18,3 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> e de 20,2 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> de acidez total, respectivamente, nas profundidades de 0-5 e 5-10 cm, quando comparado ao tratamento pousio (Tabela 5). Nas parcelas com mucuna ocorreu a maior entrada de N via fixação biológica (Bettiol, 2017), que é um dos

principais fatores relacionados à acidificação, uma vez que haverá maior entrada de  $H^+$  por meio da nitrificação, além de maior remoção de bases por lixiviação e maior produtividade e exportação de bases pelos grãos de milho. O cultivo de feijão-de-porco e milheto, e o pousio, não apresentaram efeitos neste atributo, corroborando com estudos de Moreti et al. (2007), os quais não identificaram alterações nos valores de  $H^+Al$  de um Latossolo Vermelho distrófico argiloso quando cultivado com milheto como planta de cobertura. O fato de a planta de cobertura feijão-de-porco não ter aumentado a acidez pode estar associado a maior concentração de cátions básicos em sua fitomassa.

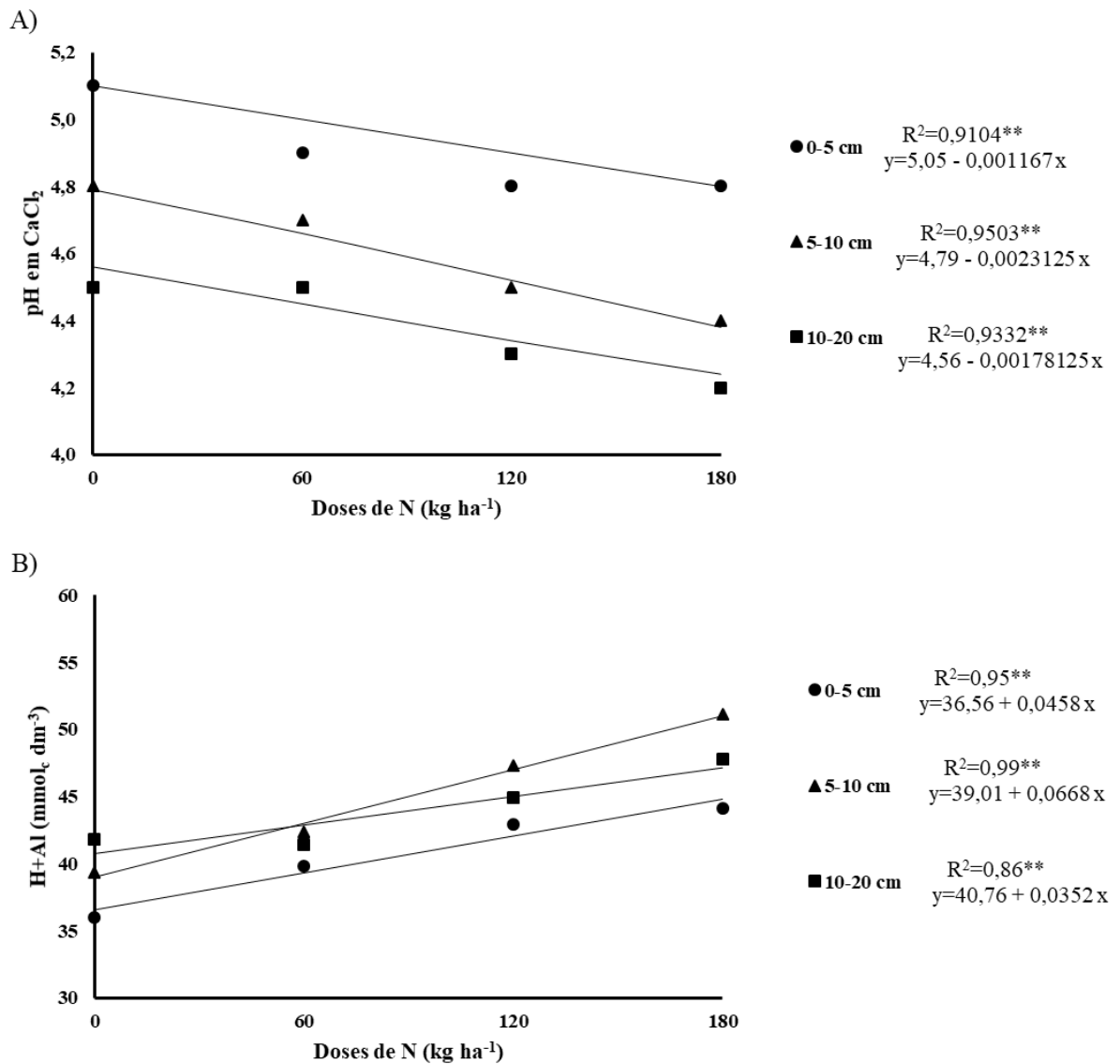
A influência da planta de cobertura na acidez do solo depende da espécie e da época de manejo de seus resíduos, podendo aumentar ou diminuir o valor de pH dos solos, efeito que está associado principalmente ao aumento de MOS. Ainda, como as plantas de cobertura são manejadas no florescimento, há maior quantidade de cátions básicos na fitomassa, os quais favorecem o aumento do pH, e maior quantidade de C orgânico solúvel, que pode complexar  $Al^{3+}$ . As plantas da cultura principal não têm efeito, devido ao fato de serem manejadas após o período de maturação fisiológica do grão (Lima Filho et al., 2014).

Quant ao efeito das doses de N observa-se que o aumento da dose resultou em diminuição do valor de pH em  $CaCl_2$  e aumento da acidez total em todas as profundidades (Figura 1).

Nas profundidades de 0-5 e 5-10 cm a acidez ficou classificada como alta na maior dose de N e muito alta na profundidade de 10-20 cm (Raij et al., 1996). Fernandes (2019) obteve resultados semelhantes e identificou que o aumento da dose de N até  $180 \text{ kg ha}^{-1}$  pode reduzir o pH até 20 cm de profundidade (Tabela 5, Figura 1).

A adubação nitrogenada promove acidificação do solo pela geração de íons  $H^+$  e remoção de bases. Uma vez adicionado N-amoniaco ou N-ureia ocorrem os processos de amonificação e nitrificação, os quais são realizados por bactérias autotróficas do solo. O  $N-NH_4^+$  em condições naturais permanece por pouco tempo no solo, sendo rapidamente convertido em  $N-NO_3^-$  (nitrificação). Nesse processo de oxidação do amônio ( $NH_4^+$ ) para conversão em nitrato ( $NO_3^-$ ) há geração de íons  $H^+$ .

Outro fato é que, nas camadas superficiais do solo há maior teor de matéria orgânica, com predomínio de cargas negativas, que repelem o  $\text{NO}_3^-$ , tornando-o mais suscetível à lixiviação. Ao lixiviar, o  $\text{NO}_3^-$  forma par iônico com cátions que podem ser nutrientes de plantas, e sua lixiviação pode acelerar o processo de perda de bases do sistema.



**Figura 1.** Valores de pH em  $\text{CaCl}_2$  (A) e  $\text{H}+\text{Al}$  (B) em função das doses de N nas profundidades de 0-5, 5-10 e 10-20 cm.

A adubação nitrogenada proporciona maior crescimento vegetativo e absorção de nutrientes, os quais em sua maioria são bases, promovendo exportação destes elementos. Uma vez que há remoção de bases e geração de íons  $\text{H}^+$  no solo

pela adubação nitrogenada, dissolução do  $\text{CO}_2$  e liberação de exsudatos radiculares, a tendência é ocorrer maior acidificação do solo.

Desta forma, é extremamente importante atentar para a acidificação provocada pelo fertilizante nitrogenado, pois além de prejudicar a disponibilidade de alguns nutrientes, pode aumentar a concentração de alumínio ( $\text{Al}^{3+}$ ) na forma tóxica para as plantas (Silva et al., 2015) e tal problema pode ser corrigido pela aplicação de calcário (Fernandes, 2019).

#### 4.4. Cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), magnésio ( $\text{Mg}^{2+}$ ) e potássio ( $\text{K}^+$ ) trocáveis

##### a) Efeito das plantas de cobertura

Foi notado efeito do cultivo de plantas de cobertura e de doses de N na concentração de  $\text{Ca}^{2+}$  em todas as profundidades avaliadas e efeito de interação somente na profundidade de 10-20 cm (Tabela 6).

**Tabela 6.** Cálcio trocável do solo ( $\text{Ca}^{2+}$ ) em função das plantas de cobertura e doses de nitrogênio nas profundidades de 0 a 5, 5 a 10 e 10 a 20 cm.

Plantas de Cobertura	Profundidade		
	0 a 5 cm	5 a 10 cm	10 a 20 cm
	----- mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----		
Pousio	23,1 b	18,3 ab	11,7 ab
Mucuna	19,4 c	11,9 c	10,6 b
Feijão-de-porco	27,4 a	19,9 a	15,0 a
Milheto	21,9 b	14,7 bc	9,8 b
CV	6,72%	21,04%	32,41%
	----- Teste F -----		
Blocos	37,26**	6,50*	1,79ns
Plantas de cobertura	75,00**	18,01**	5,88*
Dose de N	7,24**	28,84**	4,68**
Interação	1,61ns	0,56ns	14,42**

CV: coeficiente de variação; \*\*, \* e ns significativo a 1%, 5% e não significativo, respectivamente. Médias com letras iguais na coluna não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

O tratamento com a planta de cobertura mucuna-cinza proporcionou menor teor de  $\text{Ca}^{2+}$  nas camadas de 0-5 e 5-10 cm de profundidade, mas em ambas as situações continuam classificados como altos, segundo critérios de Raij et al. (1996). O  $\text{Ca}^{2+}$  é lentamente liberado do tecido vegetal, pois é constituinte da parede celular

e tem função de manutenção das membranas, formando compostos mais estáveis e recalcitrantes (Perin et al., 2010). Desta forma, pode-se inferir que os teores altos de  $\text{Ca}^{2+}$  no solo são devidos a manutenção de resíduo vegetal e, ainda, por este cátion ter preferência de adsorção no complexo coloidal do solo.

Observa-se que a planta de cobertura feijão-de-porco proporcionou maior concentração de  $\text{Ca}^{2+}$  em todas as profundidades (Tabela 6). Esta espécie apresenta capacidade de adaptação em diversas condições edafoclimáticas (Teodoro et al., 2011) e é indicada para cultivo em solos ácidos e de baixa fertilidade (Padovan et al., 2010). Pereira et al. (2017), avaliando o acúmulo de nutrientes nos tecidos de plantas de cobertura, identificaram que o feijão-de-porco apresentou maior concentração de  $\text{Ca}^{2+}$  em sua fitomassa, além de produzir em média 24,99 t  $\text{ha}^{-1}$  de matéria seca, enquanto a mucuna produziu somente 7,32 t  $\text{ha}^{-1}$ . Estas características da espécie justificam porque o feijão-de-porco se destacou em relação às demais na ciclagem de  $\text{Ca}^{2+}$  no sistema em avaliação (Tabela 6).

Houve efeito de plantas de cobertura nos teores de magnésio trocável ( $\text{Mg}^{2+}$ ) nas profundidades de 0-5 e 5-10 cm e efeito de doses e interação nas profundidades de 5-10 a 10-20 cm (Tabela 7).

**Tabela 7.** Magnésio trocável ( $\text{Mg}^{2+}$ ) do solo em função das plantas de cobertura e doses de nitrogênio nas profundidades de 0 a 5, 5 a 10 e 10 a 20 cm.

Plantas de Cobertura	Profundidade		
	0 a 5 cm	5 a 10 cm	10 a 20 cm
	----- mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----		
Pousio	12,2 ab	9,3 a	6,6
Mucuna	8,3 c	4,5 c	4,4
Feijão-de-porco	10,6 b	6,7 b	5,1
Milheto	13,7 a	8,4 a	6,1
CV	15,59%	17,77%	36,69%
	----- Teste F -----		
FV			
Blocos	5,73*	13,28**	1,93ns
Plantas de cobertura	28,40**	43,05**	3,69ns
Dose de N	2,41ns	26,71**	50,83**
Interação	0,97ns	2,33*	5,39**

CV: coeficiente de variação; \*\*, \* e ns significativo a 1%, 5% e não significativo, respectivamente. Médias com letras iguais na coluna não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

O solo sob milho e o tratamento pousio apresentaram maiores teores de  $Mg^{2+}$  nas profundidades de 0-5 e 5-10 cm. Os teores de  $Mg^{2+}$  do solo sob mucuna-cinza são classificados (Raij et al., 1996) como alto e baixo nas profundidades de 0-5 e 5-10 cm, respectivamente. Para as demais plantas de cobertura os teores se encontram em teores médios e altos. Os menores teores de  $Mg^{2+}$  no solo sob fabáceas podem estar associados a acidificação provocada por estas espécies, com diminuição da concentração deste elemento adsorvido ao complexo coloidal.

Na profundidade de 0-5 cm houve efeito somente das plantas de cobertura na concentração de potássio trocável ( $K^+$ ), em 5-10 cm houve efeito de plantas de cobertura e de doses de N e na profundidade de 10-20 cm houve somente efeito de interação (Tabela 8).

**Tabela 8.** Potássio trocável ( $K^+$ ) do solo em função das plantas de cobertura e doses de nitrogênio nas profundidades de 0 a 5, 5 a 10 e 10 a 20 cm.

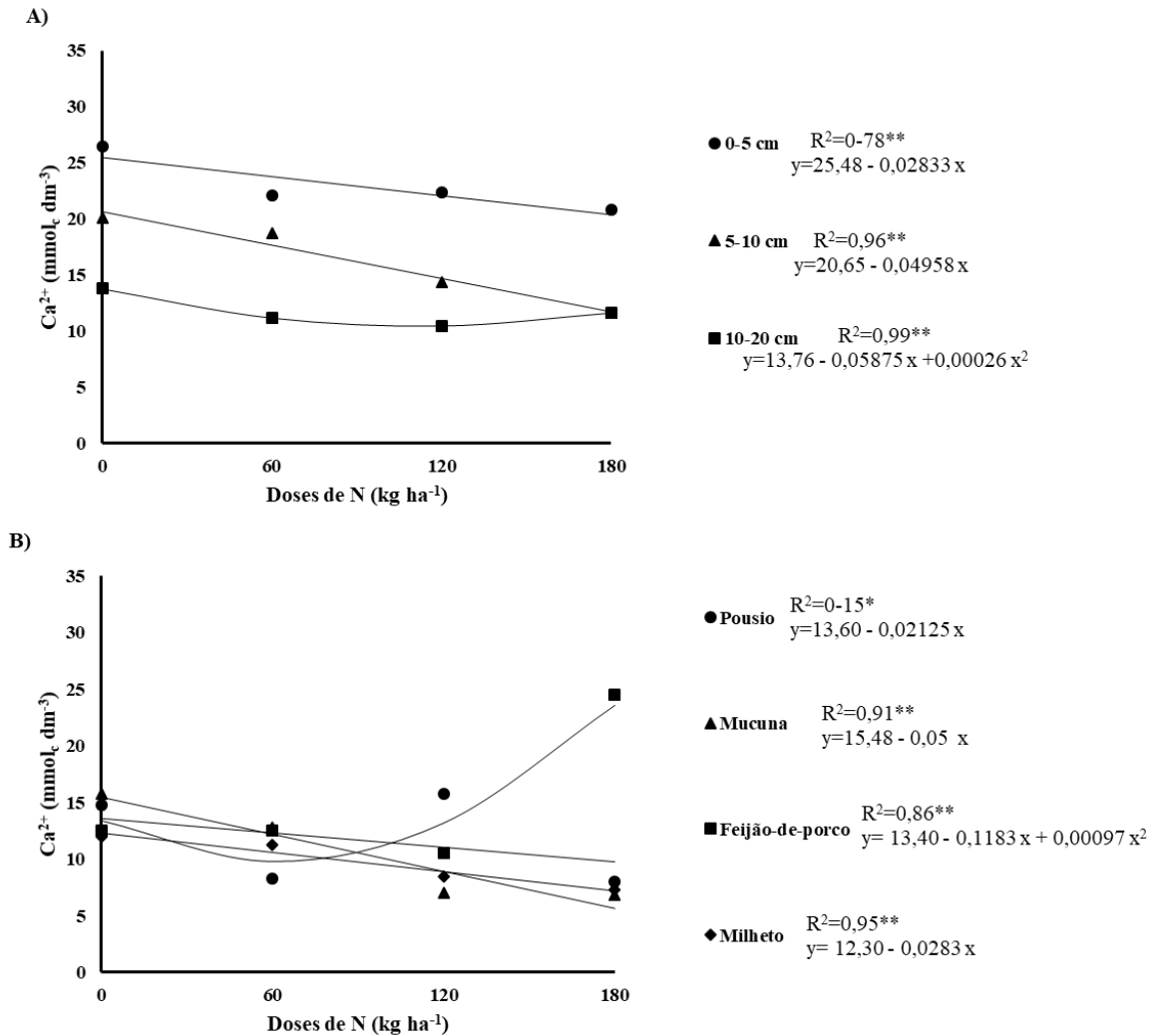
Plantas de Cobertura	Profundidade		
	0 a 5 cm	5 a 10 cm	10 a 20 cm
	----- mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----		
Pousio	7,3 a	5,2 a	3,0
Mucuna	4,4 b	3,5 b	2,2
Feijão de porco	6,3 a	4,5 ab	2,8
Milheto	6,8 a	4,6 a	2,4
CV	18,54%	22,51%	30,94%
	----- Teste F -----		
Blocos	8,55**	5,06*	8,33**
Plantas de cobertura	19,52**	8,30**	3,16ns
Dose de N	1,28ns	6,62**	1,00ns
Interação	1,32ns	2,06ns	2,44*

CV: coeficiente de variação; \*\*, \* e ns significativo a 1%, 5% e não significativo, respectivamente. Médias com letras iguais na coluna não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Nas profundidades de 0-5 e 5-10 cm o tratamento com mucuna-cinza proporcionou menor concentração de  $K^+$  trocável no solo (Tabela 8), sempre associado a maior acidez provocada por esta planta de cobertura. O  $K^+$  é o elemento mais abundante no tecido vegetal, presente na forma iônica e, desta forma, não faz parte de moléculas orgânicas. Assim, é rapidamente liberado ao solo se tornando suscetível à perda por lixiviação em condições de baixa CTC ou solos ácidos.

### b) Efeito de doses de N ou de interação planta de cobertura x dose

Com o aumento da dose de N houve diminuição nos teores de  $\text{Ca}^{2+}$  nas profundidades de 0-5 e 5-10 cm, enquanto na profundidade de 10-20 cm houve aumento (Figura 2A).



**Figura 2.** Cálcio trocável ( $\text{Ca}^{2+}$ ) em função das doses de N nas profundidades de 0-5, 5-10 e 10-20 cm (A) e interação entre doses e plantas de cobertura na profundidade de 10-20 cm (B).

O aumento da dose de N pode ter provocado diminuição na disponibilidade de  $\text{Ca}^{2+}$ , acompanhando o aumento na acidez, nas profundidades de 0-5 e 5-10 cm. Na profundidade de 10-20 cm houve comportamento quadrático e tal fato pode estar associado a lixiviação, pois o aumento da dose em cobertura do milho pode ter

provocado movimentação de  $\text{Ca}^{2+}$ , aumentado sua concentração na camada mais profunda (Figura 2A).

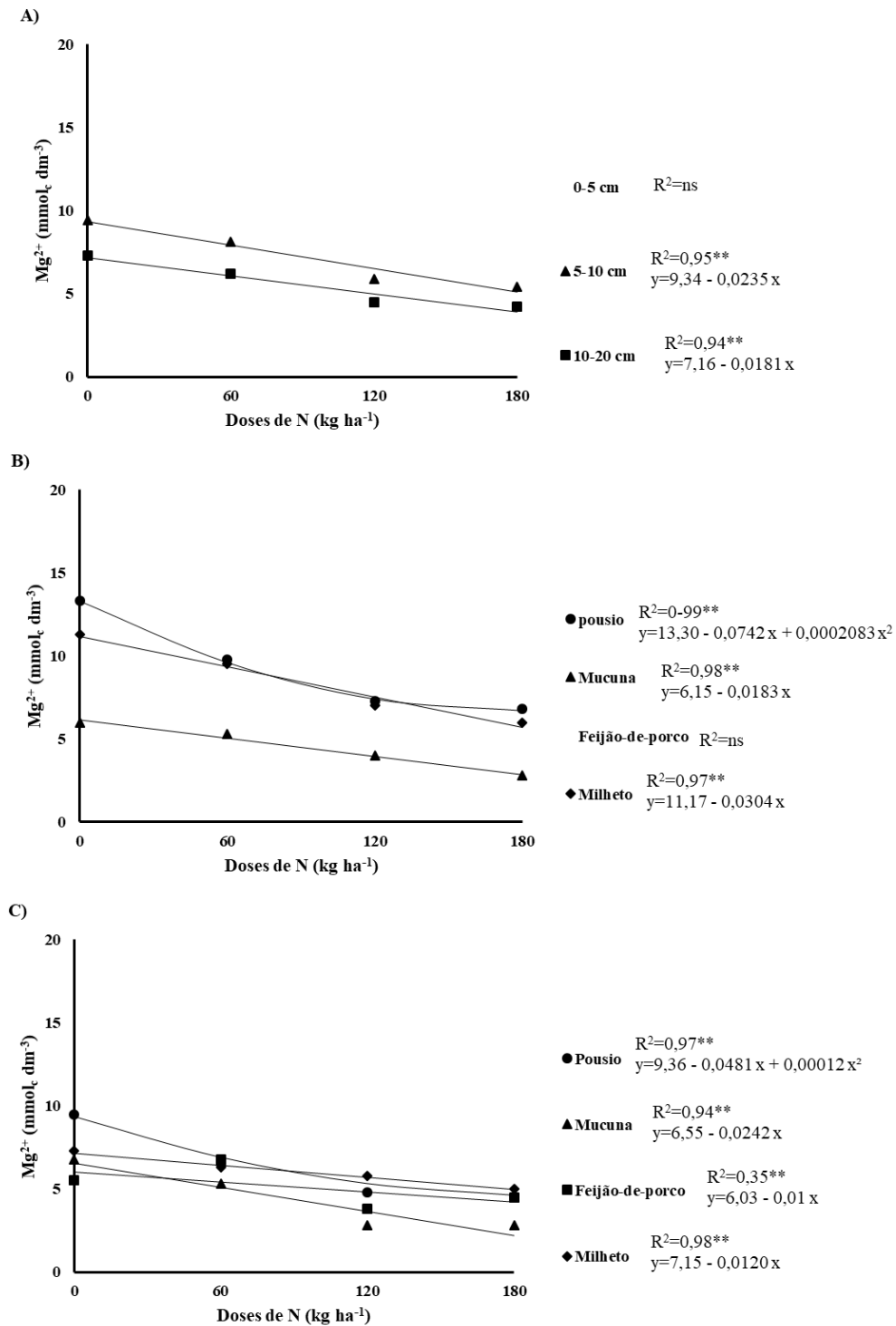
Na profundidade de 10-20 cm houve efeito de interação entre as plantas de cobertura e doses de N. Observa-se que o aumento da dose de N proporcionou aumento da concentração de  $\text{Ca}^{2+}$  no solo quando cultivado feijão-de-porco e diminuição quando cultivadas as demais plantas de cobertura e no solo em pousio (Figura 2B).

O aumento da concentração de  $\text{Ca}^{2+}$  do solo cultivado com feijão-de-porco tem ligação com o aumento da dose de N e a maior produção de fitomassa, que promove maior absorção e acúmulo do elemento no tecido vegetal, aliado às características intrínsecas desta planta de cobertura, como relatado anteriormente. A diminuição da concentração de  $\text{Ca}^{2+}$  no solo pelo aumento da dose de N, observado com as demais espécies de cobertura pode estar associada com a acidificação do solo e lixiviação provocada pelas transformações do N.

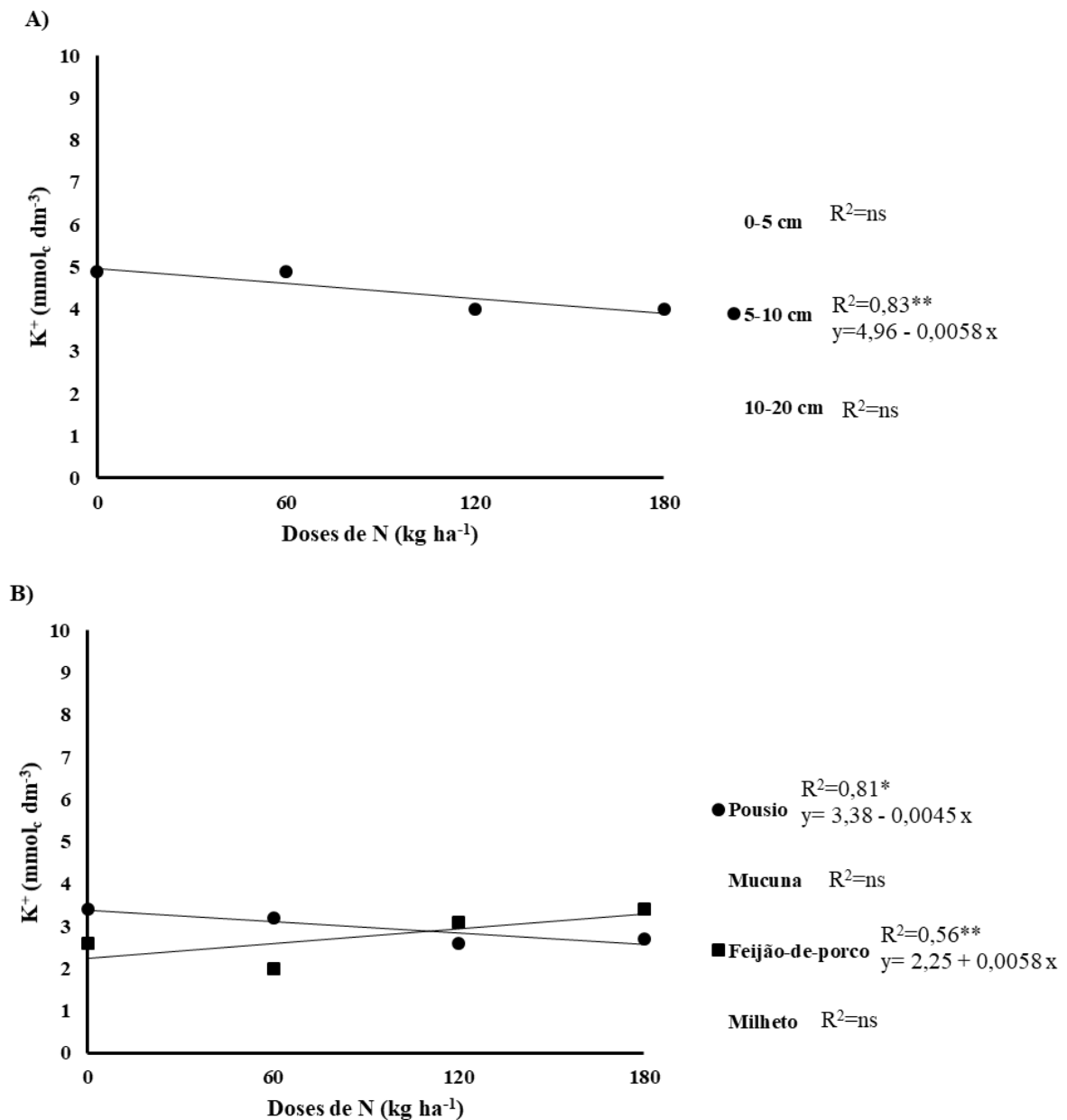
A adubação nitrogenada influenciou os teores de  $\text{Mg}^{2+}$  nas profundidades de 5-10 e 10-20 cm, diminuindo sua concentração com o aumento da dose de N (Figura 3A).

Na profundidade de 5-10 cm, com o aumento da dose de N houve diminuição na concentração de  $\text{Mg}^{2+}$  do solo quando cultivado com mucuna-cinza, milho e vegetação espontânea, enquanto sob o cultivo com feijão-de-porco não houve influência da adubação nitrogenada (Figura 3B). Na profundidade de 10-20 cm houve diminuição no teor de  $\text{Mg}^{2+}$  do solo, independentemente da espécie de planta usada como cobertura (Figura 3C).

O teor de  $\text{K}^+$  na profundidade de 5-10 cm diminuiu linearmente com as doses de N (Figura 4A) e na profundidade de 10-20 cm as doses de N influenciaram a concentração de  $\text{K}^+$  do solo somente quando cultivado feijão-de-porco e sob vegetação espontânea (Figura 4B). Nessa camada, no solo em pousio o teor de  $\text{K}^+$  diminuiu linearmente, e com cultivo de feijão-de-porco, a concentração de  $\text{K}^+$  aumentou juntamente com o aumento da dose de N.



**Figura 3.** Magnésio trocável ( $Mg^{2+}$ ) em função das doses de N (A) e de interação entre plantas de cobertura e doses de N na profundidade de 5-10 cm (B) e 10-20 cm (C).



**Figura 4.** Potássio trocável em função das doses de N (A) e efeito de interação entre plantas de cobertura e doses de N na profundidade de 10-20 cm.

A diminuição no teor de  $K^+$  do solo pode estar associada com a acidificação provocada pelo fertilizante nitrogenado. O aumento de seu teor com o cultivo de feijão-de-porco tem relação com o maior desenvolvimento vegetativo que esta espécie pode apresentar com a adubação nitrogenada, o que acarreta maior absorção de nutrientes, preservando-os no sistema por mais tempo. Tal fato foi constatado por Giacomini et al. (2003), que identificaram maior acúmulo de  $K^+$  em

tratamentos com plantas de cobertura do que em solo com vegetação espontânea. Pereira et al. (2017) identificaram que a planta de cobertura feijão-de-porco proporcionou maior acúmulo de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{K}^+$  na fitomassa sem aumentar o teor de  $\text{K}^+$  no solo. Entretanto, no presente trabalho foi possível identificar a interação positiva que esta planta de cobertura tem com a adubação nitrogenada para aumentar a concentração destes dois nutrientes no solo e contribuir com o manejo mais sustentável em regiões tropicais. Desta forma, é de extrema importância a utilização de plantas de cobertura em áreas com baixos níveis de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{K}^+$  para favorecer a ciclagem, o acúmulo e a disponibilização destes nutrientes para a cultura sucessora (Teodoro et al., 2011).

#### 4.5. Soma de bases (SB)

Para os valores de SB ocorreu diferença entre as plantas de cobertura e as doses de N nas profundidades de 0-5 e 5-10 cm. Na profundidade de 10-20 cm houve somente efeito de doses e interação (Tabela 9).

**Tabela 9.** Soma de bases (SB) em função das plantas de cobertura e doses de nitrogênio nas profundidades de 0 a 5, 5 a 10 e 10 a 20 cm.

Plantas de Cobertura	Profundidade		
	0 a 5 cm	5 a 10 cm	10 a 20 cm
----- mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----			
Pousio	42,5 a	32,7 a	21,0
Mucuna-cinza	31,9 b	20,0 b	16,9
Feijão-de-porco	44,1 a	31,0 a	22,9
Milheto	42,4 a	27,6 a	18,3
CV	8,10%	17,09%	29,61%
----- Teste F -----			
Blocos	25,79**	10,38**	3,23ns
Plantas de cobertura	47,52**	22,43**	3,34ns
Dose de N	8,37**	39,88**	11,79**
Interação	1,20ns	1,15ns	12,52**

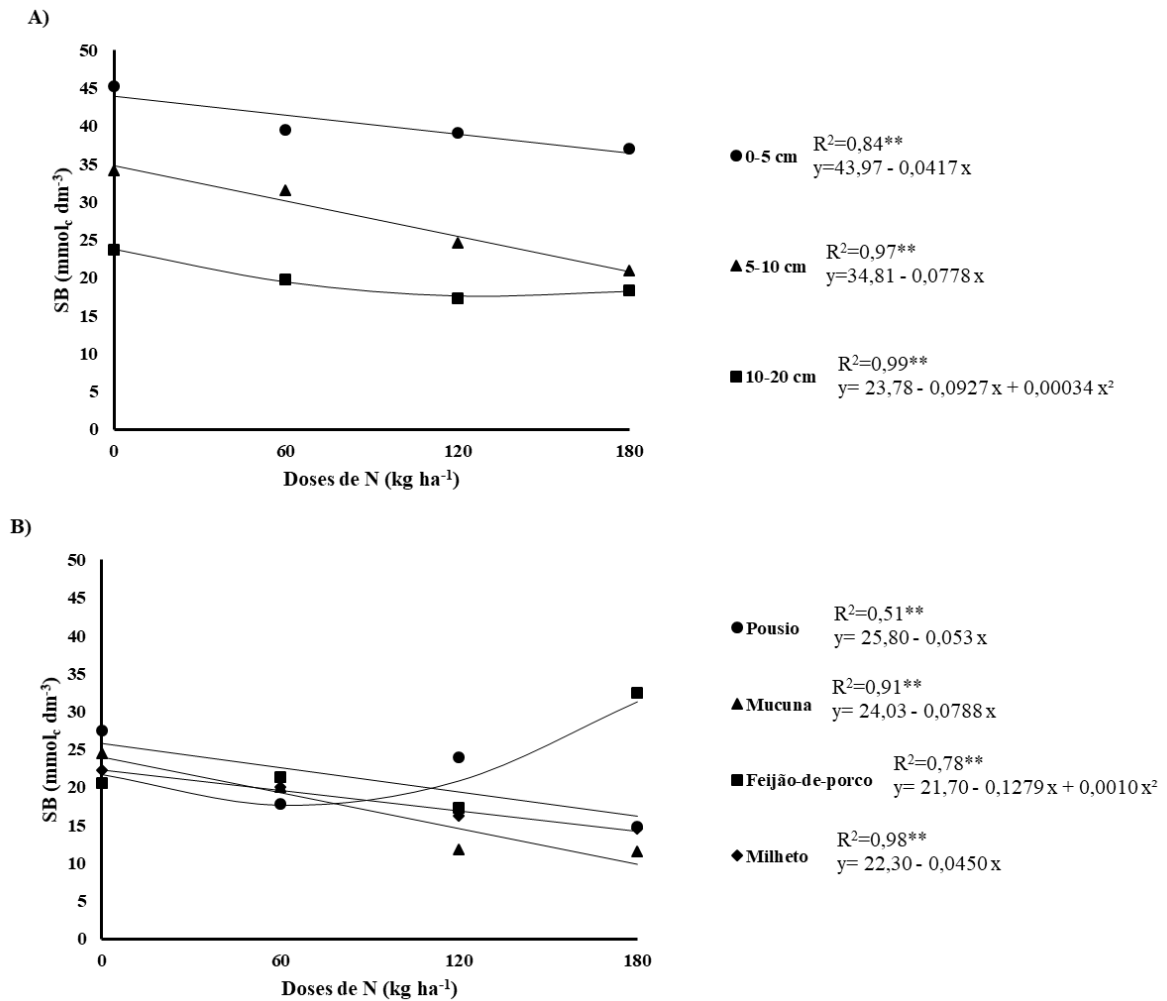
CV: coeficiente de variação; \*\*, \* e ns significativo a 1%, 5% e não significativo, respectivamente. Médias com letras iguais na coluna não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Plantas de cobertura podem liberar acetatos, malatos e outros sais orgânicos de Ca e Mg. No solo, estes sais podem complexar íons  $\text{H}^+$  da solução e liberar

bases. Este processo faz com que íons  $H^+$  desorvam e bases adsorvam aos coloides, fazendo com que a CTC do solo seja ocupada por bases e, conseqüentemente, os valores de SB aumentem (Silva et al., 2014). Entretanto, nas profundidades de 0-5 e 5-10 cm o tratamento com mucuna-cinza proporcionou menor SB que as demais plantas de cobertura e o pousio (Tabela 9). Tal fato está associado a menor concentração de cátions básicos ( $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  e  $K^+$ ) no solo quando cultivado com esta planta de cobertura (Tabelas 6, 7 e 8), corroborando com resultados encontrados por Ambrosano et al. (2016), os quais identificaram que a mucuna-cinza proporcionou menores teores de Ca, Mg e K no solo, e conseqüentemente menor SB.

Nas profundidades de 0-5 e 5-10 cm houve diminuição dos valores de SB com o aumento das doses de N, e na profundidade de 10-20 cm ocorreu aumento (Figura 5A). Assim, como discutido para os valores isolados das bases trocáveis, com o aumento da dose de N pode haver maior geração de íons  $H^+$  e movimentação de cátions básicos para camadas mais profundas, diminuindo a SB nas profundidades de 0-5 e 5-10 cm e aumentando na profundidade de 10-20 cm.

Quando o efeito de dose é comparado dentro de cada planta de cobertura na profundidade de 10-20 cm, observa-se que, com o aumento da dose de N houve diminuição nos valores de SB do solo sob pousio, mucuna-cinza e milheto, enquanto no solo cultivado com feijão-de-porco, houve aumento (Figura 5B). Como relatado anteriormente, a planta de cobertura feijão-de-porco pode ter proporcionado maior ciclagem de cátions básicos, principalmente  $Ca^{2+}$  e  $K^+$ , fazendo com que tenha resposta ao aumento da dose de N.



**Figura 5.** Valores de soma de bases trocáveis (SB) em função das doses de N nas profundidades de 0-5, 5-10 e 10-20 cm (A) e interação entre plantas de cobertura e doses de N na profundidade de 10-20 cm (B).

#### 4.6. Capacidade de troca de cátions total (CTC)

Não houve efeito dos tratamentos e interação na capacidade de troca de cátions (CTC) nas profundidades de 0-5 e 10-20 cm (Tabela 10). Todavia, na profundidade de 5-10 cm, as plantas de cobertura mucuna-cinza e feijão-de-porco resultaram em maiores valores. Desta forma, fica evidenciado que a planta de cobertura reflete na qualidade do solo, pois a cobertura mucuna-cinza se destacou por aumentar a CTC do solo na profundidade de 5-10 cm nas condições avaliadas, o que pode estar associado ao maior teor de COT (Tabela 2), sendo que, o feijão-de-porco também apresentou tendência de aumento de CTC associado ao aumento de COT.

**Tabela 10.** Capacidade de troca de cátions total (CTC) em função das plantas de cobertura e doses de nitrogênio nas profundidades de 0 a 5, 5 a 10 e 10 a 20 cm.

Plantas de Cobertura	Profundidade		
	0 a 5 cm	5 a 10 cm	10 a 20 cm
----- mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----			
Pousio	77,8	70,7 ab	63,6
Mucuna-cinza	85,7	78,1 a	65,8
Feijão de porco	81,5	76,1 a	65,5
Milheto	78,4	66,4 b	60,1
CV	11,31%	10,94%	11,26%
----- Teste F -----			
Doses de N (kg ha <sup>-1</sup> )			
0	81,3	73,5	65,4
60	79,1	73,9	61,3
120	81,8	71,8	62,2
180	81,2	72,0	66,1
CV	7,83%	8,51%	9,10%
Blocos	1,61ns	1,89ns	1,74ns
Plantas de cobertura	2,50ns	7,06**	2,09ns
Dose de N	0,55ns	0,49ns	2,68ns
Interação	1,31ns	0,16ns	1,07ns

CV: coeficiente de variação; \*\*, \* e ns significativo a 1%, 5% e não significativo, respectivamente. Médias com letras iguais na coluna não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Na Tabela 10 pode-se observar que a mucuna e o feijão-de-porco proporcionaram aporte de MOS de melhor qualidade por aumentar a CTC, fator de extrema importância para a fertilidade do solo. Comparando a média ponderada de CTC das três profundidades avaliadas no solo sob pousio (68,9 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>) com a CTC média ponderada das três profundidades do solo cultivado com mucuna-cinza (73,9 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>) e feijão-de-porco (72,2 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>) houve aumento de 4,9 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> e 3,2 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>, respectivamente, na camada de 0-20 cm. Levando em consideração a mesma camada arável, a planta de cobertura mucuna-cinza foi capaz de aumentar a capacidade de armazenamento de Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> e K<sup>+</sup> em aproximadamente 197 kg ha<sup>-1</sup>, 120 kg ha<sup>-1</sup> e 385 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente, e o feijão-de-porco em 129 kg ha<sup>-1</sup>, 78 kg ha<sup>-1</sup> e 252 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente.

A utilização de plantas de cobertura que fixam nitrogênio promove incremento de N-orgânico no solo, o qual é utilizado preferencialmente por microrganismos que

sintetizam frações mais estáveis da MOS (Ribeiro et al., 2011). Desta forma, a mucuna-cinza e o feijão-de-porco podem aumentar a produção de substâncias orgânicas com propriedades coloidais, como ácidos fúlvicos, conforme verificado por Rosa et al. (2017). O aumento do teor destas substâncias no solo pode contribuir para o aumento de CTC na camada de 5-10 cm pela possível movimentação da camada superficial para a mais profunda, conforme verificado neste estudo, sendo necessários mais trabalhos avaliando a movimentação vertical destas moléculas.

Diante disso, o aporte de resíduos que proporcionem a formação de MOS de melhor qualidade é de extrema importância para melhoria da fertilidade do solo, pois diminuem perdas de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{K}^+$  por lixiviação devido ao aumentando da capacidade de armazenamento desses cátions. O aumento da MOS também é positivo, pois aumenta o poder tampão do solo, prolongando o efeito da calagem e adubação e aumentando a disponibilidade de fósforo por ocupar sítios de adsorção.

#### 4.7. Porcentagem de saturação por bases (V%)

As plantas de cobertura e doses de N influenciaram os valores de saturação por bases (V%) nas profundidades de 0-5 e 5-10 cm, e na profundidade de 10-20 cm houve efeito somente de doses de N e de interações (Tabela 11).

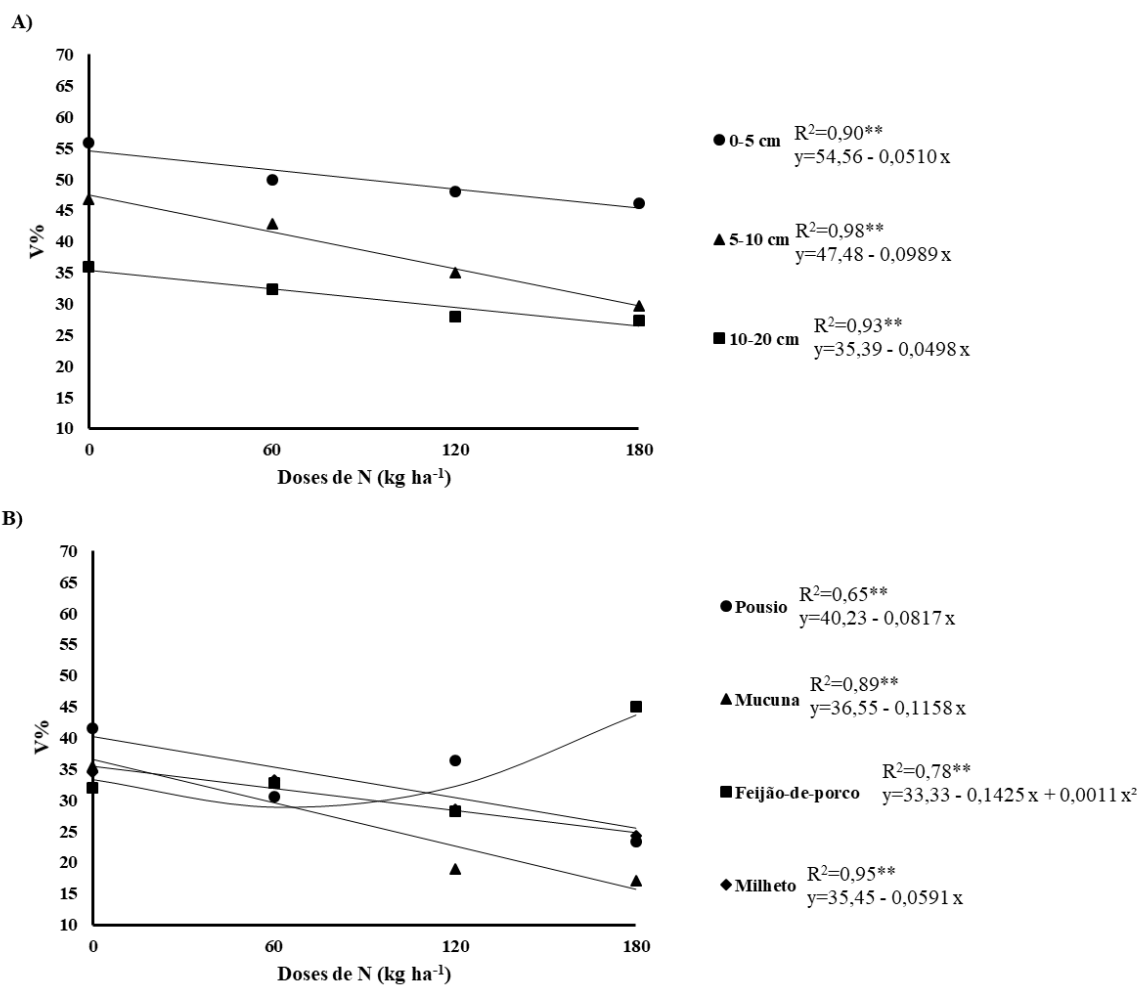
**Tabela 11.** Porcentagem de saturação por bases (V%) em função das plantas de cobertura e doses de nitrogênio nas profundidades de 0 a 5, 5 a 10 e 10 a 20 cm.

Plantas de Cobertura	0 a 5 cm	5 a 10 cm	10 a 20 cm
	----- %-----		
Pousio	54,1 a	46,13 a	32,9
Mucuna-cinza	37,5 b	25,5 b	26,1
Feijão-de-porco	54,1 a	40,6 a	34,5
Milheto	54,1 a	42,1 a	30,1
CV	13,29%	19,87%	29,49%
	----- Teste F -----		
Blocos	5,58*	6,19*	1,58ns
Plantas de cobertura	25,07**	22,20**	2,59ns
Dose de N	10,67**	28,61**	9,22**
Interação	1,10ns	1,02ns	7,84**

CV: coeficiente de variação; \*\*, \* e ns significativo a 1%, 5% e não significativo, respectivamente. Médias com letras iguais na coluna não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

A mucuna-cinza proporcionou menores valores de V% que os demais tratamentos nas profundidades de 0-5 e 5-10 cm (Tabela 11). Tal fato está associado a menor concentração de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{K}^+$  no solo, resultando conseqüentemente em menor soma de bases. Já as demais plantas de cobertura e pousio apresentaram V% semelhante.

Conforme houve aumento da dose de N ocorreu diminuição nos valores de V% em todas as profundidades (Figura 6A). Tal fato está associado a adubação nitrogenada promover remoção de cátions básicos trocáveis e introduzir íons  $\text{H}^+$  no sistema, aumentando a acidez total do solo e diminuindo a SB.



**Figura 6.** Valores de porcentagem de saturação por bases (V%) em função das doses de N nas profundidades de 0-5, 5-10 e 10-20 cm (A) e de interação entre plantas de cobertura e doses de N na profundidade de 10-20 cm (B).

Na profundidade de 10-20 cm as doses de N foram responsáveis por diminuir os valores de V% quando cultivados mucuna, milho e sob vegetação espontânea (Figura 6B). Desta forma, pode-se destacar que a planta de cobertura feijão-de-porco é uma boa escolha para ciclagem de nutrientes no solo, corroborando com os resultados de Brito et al. (2017). Os autores, ao avaliarem a reciclagem de macronutrientes por espécies utilizadas como adubos verdes e seu efeito no desenvolvimento e produtividade da cultura de milho em sucessão, identificaram que o feijão-de-porco favoreceu a maior produtividade do milho, tornando-se uma espécie com grande potencial para ser utilizada como adubo verde na região de estudo.

## 5. CONCLUSÕES

O cultivo das plantas de cobertura, independentemente se gramínea ou leguminosa, aumentou os teores de carbono orgânico total e solúvel, melhorando a qualidade do solo.

A mucuna-cinza foi a espécie que mais favoreceu o acúmulo de carbono e a acidificação do solo, enquanto o feijão-de-porco mostrou-se eficiente para promover acúmulo de carbono, sem favorecer a acidificação.

A planta de cobertura feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis* L.) é a mais eficiente para ciclagem de nutrientes no solo, apresentando também tendência em aumento de COT.

A adubação nitrogenada não resultou em melhoria do solo, observando-se apenas efeitos de interação, em poucas situações, com as espécies de cobertura.

## 6. REFERÊNCIAS

Ambrosano EJ, Wutuke EB, Salgado GC, Rossi F, Dias FLF, Tavares S, Otsuk IP (2016) Caracterização de cultivares de Mucuna quanto a produtividade de fitomassa, extração de nutrientes e seus efeitos nos atributos do solo. **Anais...** Dourados: Agroecol, p. 1-10 (Caderno de Agroecologia).

Andreola F, Costa LM, Olszewski N, Jucksch I (2000) A cobertura vegetal de inverno e a adubação orgânica e, ou, mineral influenciando a sucessão feijão/milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 24:867-874.

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, 27., Brasília, DF. **Resumos...** Brasília: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, CD-ROM.

Bai SH, Blumfield TJ, Xu ZH, Chen CR, Wild C (2012) Soil organic matter dynamics and nitrogen availability in response to site preparation and management during revegetation in tropical Central Queensland, Australia. **Jornal of Soils and Sediments** 12:386–395.

Baldotto MA, Baldotto LEB (2014) Ácidos húmicos. **Revista Ceres** 61:856-881.

BENITES, V. M.; MADARI, B; MACHADO, P. L. O. A. Extração e fracionamento quantitativo de substâncias húmicas do solo: Um procedimento simplificado de baixo custo. Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2003. 7p. (Comunicado Técnico)

Bettiol ACT (2017) **Avaliação do nitrogênio orgânico mineralizável em solo cultivado com milho em sucessão a plantas de cobertura. 62 f.** Tese (Doutorado em Agronomia Ciência do Solo), Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 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 Agricultural Research** 46:1459–1466.

BOUMA J (2002) Land quality indicator of sustainable land management across scales. **Agriculture, Ecosystems & Environment** 88:129-136.

Brady NC, Weil RR (3 ed) (2013) Elementos da natureza e propriedades dos solos. Porto Alegre: Artmed, 716 p.

Bressan SB, Nóbrega JCA, Nóbrega RSA, Barbosa RS, Sousa LB (2013) Plantas de cobertura e qualidade química de Latossolo Amarelo sob plantio direto no cerrado maranhense. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** 17:371–378.

Brito et al. (2017)

BRITO MF, TSUJIGUSHI BP, ROCHA DP, SILVA RF (2017) Reciclagem de nutrientes de adubos verdes e produtividade de milho cultivado em sucessão em agroecossistema de transição agroecológica. **Acta Iguazu** 6:11-21.

Burton J, Chen CR, Xu ZH, Ghadiri H (2010) Soil microbial biomass, activity and community composition in adjacent native and plantation forests of subtropical Australia. **Journal of Soils and Sediments** 10:1267–1277.

Caires EF, Garbuio FJ, Alleoni LRF, Cambri MA (2006) Calagem superficial e cobertura de aveia preta antecedendo os cultivos de milho e soja em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 30:87-98.

CAMARGO, O. A.; MONIZ, A. C.; JORGE, J. A.; VALADARES, J. M. A. S. Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agrônomo de Campinas. Campinas: Instituto Agrônomo, 2009. 77p. (Boletim técnico, 106)

Carvalho AM, Coelho CM, Dantas RA, Fonseca OP, Carneiro RG, Figueiredo CC (2012) Chemical composition of cover plants and its effect on maize yield in no-tillage systems in the Brazilian savanna. **Crop & Pasture Science** 63:1075-1081.

Chen CR, Xu ZH (2008) Analysis and behavior of soluble organic nitrogen in forest soils. **Jornal of Soils and Sediments** 8:363–378.

Chen CR, Xu ZH, Zhang SL, Keay P (2005) Soluble organic nitrogen pools in forest soils of subtropical Australia. **Plant Soil** 77:285–297.

Chen R, Yran MS, Blangodatsky S, Myachina O, Dittert K, Lin X, Blangodatskaya E, Kuzyakov Y (2013) Soil C and N availability determine the priming effect: microbial N mining and stoichiometric decomposition theories. **Global Change Biology** 1:1-12.

Ciotta MN, Bayer C, Ernani PR, Fontoura SMV, Albuquerque JA, Wobeto C (2002) Acidificação de um Latossolo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 26:1055-1064.

Craine JM, Morrow C, Fierer NO (2007) Microbial nitrogen limitation increases decomposition. **Ecology** 88:2105–2113.

Curtin D, Wright CE, Beare MH, Mccallum FM (2006) Hot water extractable nitrogen as an indicator of soil nitrogen availability. **Soil Science Societe American Journal** 70:1512–1521.

DERPSCH, R.; CALEGARI, A. Plantas para adubação verde de inverno. Iapar: Londrina. 1992. 80 p. (Circular 73)

Diehl RC, Miyazawa M, Takahashi HW (2008) Compostos orgânicos hidrossolúveis e resíduos vegetais e seus efeitos nos atributos químicos do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 32:2653-2659.

Diekow J, Mielniczuk J, Knicker H, Bayer C, Dick DP, Kögel-Knabner I (2005) Soil C e N stocks as affected by cropping systems and nitrogen fertilization in the southern Brazil Acrisol managed under no-tillage for 17 years. **Soil and Tillage Research** 81:87-95.

Ensinas SC, Serra AP, Marchetti ME, Silva EF, Prado EAF, Lourente ERP, Altomar PH, Potrich DC, Martinez MA, Conrad VA, Jesus MV, El Kadri TC (2016) Cover crops affect on soil organic matter fractions under no till system. **Australian Journal of Crop Science** 10:503-512.

ESPINDOLA, J.A.A., ALMEIDA, D.L. & GUERRA, J.G.M. Benefícios da adubação verde sobre a simbiose micorrízica e a produtividade da batata-doce [online]. Seropédica: Embrapa Agrobiologia. 1997, 6 p. (Comunicado Técnico, no. 14.)

Faccin FC, Marchetti ME, Serra AP, Ensinas SC (2016) Frações granulométricas da matéria orgânica do solo em consórcio de milho safrinha com capim-marandú sob fontes de nitrogênio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 51:2000-2009.

Fernandes VC (2019) **Calagem, gessagem, culturas de cobertura e adubação nitrogenada em sistema plantio direto: características químicas do solo, estado nutricional e produtividade do milho**. 59 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia), Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira.

Fontana A, Pereira MG, Loss A, Cunha TJF, Salton JC (2006) Atributos de fertilidade e frações húmicas de um latossolo vermelho no cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 41:847-853.

Forte CT, Galon L, Beutler NA, Perin GF, Pauletti ESS, Basso FJ, Holz CM, Santin CO (2018) Coberturas vegetais do solo e manejo de cultivo e suas contribuições para as culturas agrícolas. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias** 13:1-10.

Franchini JC, Malavolta E, Miyzawa M, Pavan MA (1999) Alterações químicas em solos ácidos após a aplicação de resíduos vegetais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 23:533-542.

Galindo FS, Buzetti S, Filho MCMT, Dupas E, Carvalho FC (2018) Manejo da adubação nitrogenada no capim-mombaça em função de fontes e doses de nitrogênio. **Revista de Ciências Agrárias** 41:900-913.

Gazolla PR, Guareschi RF, Perin A, Pereira MG, Rossi CQ (2015) Frações da matéria orgânica do solo sob pastagens, sistema plantio direto e integração lavoura-pecuária. **Ciências Agrárias** 36:693-704.

Giacomini SJ, Aita C, Vendruscolo ERO, Cubilla M, Nicoloso RS, Fries MR (2003) Matéria seca, relação c/n e acúmulo de nitrogênio, fósforo e potássio em misturas de plantas de cobertura de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 27:325-334.

Graaff MA, Groenigen KJ van, Six J, Hungate B, Kessel C van (2006) Interactions between plant growth and soil nutrient cycling under elevated CO<sub>2</sub>: a meta-analysis. **Global Change Biology** 12:2077–2091.

Grayston SJ, Vaughan D, Jones D (1997) Rhizosphere carbon flow in trees, in comparison with annual plants: the importance of root exudation and its impact on microbial activity and nutrient availability. **Applied Soil Ecology** 5:29-56.

Halisk A (2015) **Atributos químicos do solo e produtividade da soja influenciados pela calagem superficial e adubação nitrogenada no sistema plantio direto**. 61 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG), Ponta Grossa.

Han L, Sun K, Jin J, Xing B (2016) Some concepts of soil organic carbon characteristics and mineral interaction from a review of literature. **Soil Biology & Biochemistry** 94:107-121.

HAYNES RJ (2000) Labile organic matter as an indicator of organic matter quality in arable and pastoral soils in New Zealand. **Soil Biology and Biochemistry** 32:211-219.

Hessen DO, Agren GI, Anderson TR, Elser JJ, De Ruiter PC (2004) Carbon sequestration in ecosystems: the role of stoichiometry. **Ecology** 85:1179–1192.

Janssens IA, Dieleman W, Luysaert S, Subke JA, Reichstein M, Ceulemans R, Ciais P, Dolman AJ, Grace J, Matteucci G, Papale D, Piao SL, Tang J, Law BE (2010) Reduction of forest soil respiration in response to nitrogen deposition. **Nature geoscience** 3:315-322.

Kalbitz K, Solinger S, Park JH (2000) Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: a review. **Soil Science** 165:277-304.

Lehmann J, Kleber M (2015) The contentious nature of soil organic matter. **Nature** 528:60–68.

Leite LFC, Arruda FP, Costa CN, Ferreira JS, Holanda Neto MR (2013) Qualidade química do solo e dinâmica de carbono sob monocultivo e consórcio de macaúba e pastagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** 17:1257–1263.

Liljeroth E, Kuikman P, Veen JA (1994) Carbon translocation to the rhizosphere of maize and wheat and influence on the turnover of native soil organic matter at different soil nitrogen levels. **Plant and Soil** 161:233–240.

Lima Filho OF, Ambrisano EJ, Carlos JAD (2014) Adubação verde e plantas de cobertura no Brasil: fundamentos e prática. Brasília: EMBRAPA.

Lima JE, Nascente AS, Leandro WM, Silveira PMD (2016) *Urochloa ruziziensis* responses to sources and doses of urea. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** 20:401-407.

Lourente ERP, Silva EF, Mercante FM, Serra AP, Peixoto PPP, Sereia RC, Ensinas SC, Luiz Neto ALN, Alovisi AMT, Marchetti ME, Cortez JW (2016) Agricultural management systems affect on physical, chemical and microbial soil properties. **Australian Journal of Crop Science** 10: 683.

Manlay RJ, Feller C, Swift MJ (2007) Historical evolution of soil organic matter concepts and their relationships with the fertility and sustainability of cropping systems. **Agriculture, Ecosystems & Environment** 119:217–233.

Mateus GP, Crusciol CAC, Borghi E, Pariz CM, Costa C, Silveira JPF (2012) Adubação nitrogenada de sorgo granífero consorciado com capim em sistema de plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 46:1161-1169.

Mendonça ES, Matos ES (2005) Matéria orgânica do solo: métodos de análises. Viçosa: UFV, 107 p.

Michelon CJ, Junges E, Casali CA, Pellgrini JBR, Rosa Neto L, Oliveira ZB, Oliveira MB (2019) Atributos do solo e produtividade do milho cultivado em sucessão a plantas de cobertura de inverno. **Revista de Ciências Agroveterinárias** 18:230-239.

Miyazawa M, Pavan MA, Calegari A (1993) Efeito de material vegetal na acidez do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 17:411-416.

Moorhead DL, Sinsabaugh RL (2006) A theoretical model of litter decay and microbial interaction. **Ecological Monographs** 76:151–174.

Moreira FMS, Siqueira JO (2 ed) (2006) Microbiologia e bioquímica do solo. Lavras: Universidade Federal de Lavras (UFLA), 744 p.

Moreti D, Alves MC, Valério Filho WV, Carvalho M (2007) Atributos químicos de um Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de preparo, adubações e plantas de cobertura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 31:167-175.

Muñoz-Carpena R, Ritter A, Bosch DD, Schaffer B, Potter TL (2008) Summer cover crop impacts on soil percolation and nitrogen leaching from a winter corn field. **Agricultural Water Management** 95:633-644.

Nascimento PC, Lani JL, Mendonça ES, Zoffoli HJO, Peixoto HTM (2010) Teores e características da matéria orgânica de solos hidromórficos do Espírito Santo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 34:339-348.

Oliveira TP, Ensinas SC, Barbosa GF, Nanzer MC, Barreta PG, Silva MFG, Queiroz GRSS, Prado EAF (2018) Carbono lábil e frações oxidáveis de carbono em solos cultivados sob diferentes formas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável** 8:49-56.

Osterroht M von (2002) O que é uma adubação verde: princípios e ações. **Agroecologia Hoje** 14:9-11.

Padovan MP, Motta IS, Carneiro LF, Moitinho MR, Fernandes SSL (2011) Acúmulo de fitomassa e nutrientes e estágio mais adequado de manejo do feijão-de-porco para fins de adubação verde. **Revista Brasileira de Agroecologia** 6:182-190.

Pereira AO, Schoffel A, Koefender J, Camera JN, Golle DP, Horn RC (2017) Ciclagem de nutrientes por plantas de cobertura de verão. **Revista de Ciências Agrárias** 40:799-807.

Perin A, Santos RHS, Caballero SSU, Guerra JGM, Gusmão LA (2010) Acúmulo e liberação de P, K, Ca e Mg em crotalaria e milho solteiros e consorciados. **Revista Ceres** 57:274-281.

Pinheiro EFM, Pereira MG, Anjos LHC (2004) Aggregate distribution and soil organic matter under different tillage systems for vegetable crops in a Red Latosol from Brazil. **Soil & Tillage Research** 30:79-84.

Plaza-Bonilla D, Álvaro-Fuentes J, Cantero-Martínez C (2014) Identifying soil organic carbon fractions sensitive to agricultural management practices. **Soil & Tillage Research** 139:19–22.

Pulrolnik K (2009) Transformações de C no solo. Planaltina: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa Cerrados).

Purakayastha TJ, Rudrappa L, Singh D, Swarup A, Bhadraray S (2008) Long-term impact of fertilizers on soil organic carbon pools and sequestration rates in maize–wheat–cowpea cropping system. **Geoderma** 144:370–378.

Quaggio JÁ (1986) Reação do solo e seu controle. In: SIMPÓSIO AVANÇADO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO, **Anais...** Campinas: Fundação Cargill, p. 53-89.

Qualls RG, Richardson CJ (2003) Factors controlling concentration, export, and decomposition of dissolved organic nutrients in the Everglades of Florida. **Biogeochemistry** 62:197-229.

Raij B van, Cantarella H, Quaggio JÁ, Furlani AMC (1996) Interpretação de resultados de análises de solo. In.: Raij B van, Cantarella H, Quaggio JÁ, Furlani AMC (Eds.) **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agrônômico, p. 8-13.

Raij BV (2017) Fertilidade do solo e manejo de nutrientes. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute (IPNI), 420 p.

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

Rakkar MK, Blanco-Canqui H, Drijber RA, Drewnoski ME, Macdonald JC, Klopfenstein T (2017) Impacts of cattle grazing of corn residues on soil properties after 16 years. **Soil Science Society of America Journal** 81:414-424.

Rangel OJP, Silva CA, Guimarães PTJ, Guilherme LRG (2008) Frações oxidáveis do carbono orgânico de Latossolo cultivado com cafeeiro em diferentes espaçamentos de plantio. **Ciência e Agrotecnologia** 32:429-437.

Ribeiro LRP (2016) **Efeitos de plantas de cobertura e da adubação nitrogenada nas frações da matéria orgânica do solo e na produtividade do milho**. 53 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade de Brasília - Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Brasília.

Ribeiro PH, Santos JVV, Coser SM, Nogueira NO, Martins CAS (2011) Adubação verde, os estoques de carbono e nitrogênio e a qualidade da matéria orgânica do solo. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável** 6:43-50.

Rosa MD, Nóbrega LHP, Mauli MM, Lima GP, Pacheco FPP (2017) Substâncias húmicas do solo cultivado com plantas de cobertura em rotação com milho e soja. **Revista Ciência Agronômica** 48:221-230.

Rosolem CA, Calonego JC (2013) Phosphorus and potassium budget in the soil-plant system in crop rotations under no-till. **Soil and Tillage Research** 126:127-133.

Rosset JS, Lana MC, Pereira MG, Schiavo JA, Rampim L, Sarto MVM (2016) Frações químicas e oxidáveis da matéria orgânica do solo sob diferentes sistemas de manejo em Latossolo Vermelho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 51:1529-1538.

Sharma AD, Sharma H, Lightfoot DA (2011) The genetic control of tolerance to aluminum toxicity in the 'Essex' by 'Forrest' recombinant inbred line population. **Theor Appl Genet** 122:687-694.

Silva CC, Vieira FCB, Lochims DA, Mendes IS, Ferreto DOC, Weber MA (2014) Perdas de nitrato e carbono orgânico dissolvido por lixiviação em Argissolo sob sistema silvipastoril. **Anais...** Santa Ana do Livramento: Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão.

Silva EC (1 Eds) (2014) Adubação verde como fonte de nutrientes as culturas. In.: Lima Filho OF **Adubação verde e plantas de cobertura no Brasil**. Brasília: Embrapa, p. 265-306.

Silva EF, Lourentes EPR, Marchetti ME, Mercante FM, Ferreira AKT, Fujii GC (2011) Frações lábeis e recalcitrantes da matéria orgânica em solos sob integração lavoura pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 46:1321-1331.

Silva IR, Mendonça ES (2007) Matéria orgânica do solo. In.: Novais RF, Alvarez VH, Barros NF, Fontes RLF, Cantarutti RB, Neves JCL (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p.275-374.

Silva MP, Arf O, Sá E, Abrantes FL, Berti CLF, Souza LCD (2017) Plantas de cobertura e qualidade química e física de Latossolo Vermelho distrófico sob plantio direto. **Agrária** 12:60-67.

Silva MR, Pelissari A, Moraes AD, Sandini IE, Cassol LC, Assmann TS, Oliveira EB (2015) Acumulação de nutrientes e produção forrageira de aveia e azevém em função da aplicação de calcário e gesso em superfície. **Revista de Ciências Agrárias** 38:346-35.

Silveira MLA (2005) Dissolved organic carbon and bioavailability of N and P as indicators of soil quality. **ScientiaAgricola** 62:502-508.

Smebye A, Alling V, Vogt RD, Gadmar TC, Mulder J Cornelissen G, Hale SE (2015) Biochar amendment to soil changes dissolved organic matter content and composition. **Chemosphere** 142:100-105.

Souza DMG, Miranda LN, Oliveira AS (2007) Acidez do solo e sua correção. In.: Novais RF, Alvarez VH, Barros NF, Fontes RL, Cantarutti RB, Neves JCL (Eds.) **Fertilidade do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 205-275.

Souza GP, Figueiredo CC, Sousa DMG (2016) Soil organic matter as affected by management systems, phosphate fertilization, and cover crops. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 51:1668-1676.

Sparling G, Vojvodic-Vukovic M, Schipper LA (1998) Hot-water-soluble C as a simple measure of labile soil organic matter: the relationship with microbial biomass C. **Soil Biology and Biochemistry** 30:1.469-1.472.

Steenwerth K, Belina KM (2008) Cover crops enhance soil organic matter, carbon dynamics and microbiological function in a vineyard agroecosystem. **Applied Soil Ecology** 40:359-369.

Teodoro RB, Oliveira FL, Silva DMN, Fávero C, Quaresma MAL (2011) Aspectos agronômicos de leguminosas para adubação verde no Cerrado no Alto Vale do Jequitinhonha. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 35:635-643.

Veras MS, Ramos MLG, Oliveira DNS, Figueiredo CC, Carvalho AM, Pulrolnik K, Souza KW (2016) Cover Crops and Nitrogen Fertilization Effects on Nitrogen Soil Fractions under Corn Cultivation in a No-Tillage System. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 40:1-12.

Viaud V, Santillán-Carvantes P, Akkal-Corfini N, Le Guillou C, Prévost-Bouré NC, Ranjard L, Menasseri-Aubry S (2018) Landscape-scale analysis of cropping system effects on soil quality in a context of crop-livestock farming. **Agriculture, Ecosystems & Environment** 265:166-177.

Weil RR, Magdoff F (2004) Significance of soil organic matter to soil quality and health. In.: Magdoff F, Weil RR (Eds.) **Soil organic matter in sustainable agriculture**. Boca Raton: CCR Press, p. 1-43.

Wutke EB (1993) Adubação verde: manejo da fitomassa e espécies utilizadas no Estado de São Paulo. In.: Wutke EB, Bulisani EA, Mascarenhas HAA (Coords.) **Curso sobre adubação verde no Instituto Agronômico**. Campinas: Instituto Agronômico, p.17-29.

Zhou X, Wu H, Koetz E, Xu Z, Chen C (2012) Soil labile carbon and nitrogen pools and microbial metabolic diversity under winter crops in an arid environment. **Applied Soil Ecology** 53:49 – 55.

Zhou XQ, Chen CR, Lu SB, Rui YC, Wu HW, Xu ZH (2011) The short-term cover crops increase soil labile organic carbon in Southeastern Australia. **Biology and Fertility of Soils** 48:239-244.

ZSOLNAY, A. Dissolved hums in soil waters. In: PICCOLO, A. (Ed.). Humic substances in terrestrial ecosystems. Amsterdam: **Elsevier**, 1996. cap. 4, p.171-223.