

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP

CÂMPUS DE JABOTICABAL

**FORMAS LÁBEIS DE CARBONO E NITROGÊNIO NO SOLO
EM FUNÇÃO DE PLANTAS DE COBERTURA
E ADUBAÇÃO NITROGENADA**

Maira Caroline Terçariol

Engenheira Agrônoma

2020

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL

**FORMAS LÁBEIS DE CARBONO E NITROGÊNIO NO SOLO
EM FUNÇÃO DE PLANTAS DE COBERTURA
E ADUBAÇÃO NITROGENADA**

Maira Caroline Terçariol

Orientadora: Profa. Dra. Mara Cristina Pessôa da Cruz

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

2020

T315f	Terçariol, Maira Caroline Formas lábeis de carbono e nitrogênio no solo em função de plantas de cobertura e adubação nitrogenada / Maira Caroline Terçariol. -- Jaboticabal, 2020 45 p. : tabs. + 1 CD-ROM Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal Orientadora: Mara Cristina Pessoa da Cruz 1. Ciência do Solo. 2. Fertilidade do Solo. 3. Plantas de cobertura no solo. 4. Indicadores de qualidade do solo. I. Título.
-------	---

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

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: FORMAS LÁBEIS DE CARBONO E NITROGÊNIO NO SOLO EM FUNÇÃO
DE PLANTAS DE COBERTURA E ADUBAÇÃO NITROGENADA

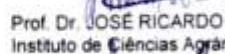
AUTORA: MAIRA CAROLINE TERÇARIOL

ORIENTADORA: MARA CRISTINA PESSOA DA CRUZ

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



Profa. Dra. MARA CRISTINA PESSOA DA CRUZ
Departamento de Solos e Adubos / FCAV / UNESP - Jaboticabal



Prof. Dr. JOSÉ RICARDO MANTOVANI
Instituto de Ciências Agrárias / UNIFENAS - Alfenas/MG



Prof. Dr. MANOEL EVARISTO FERREIRA
Departamento de Solos e Adubos / FCAV / UNESP - Jaboticabal

Jaboticabal, 07 de fevereiro de 2020

DADOS CURRICULARES DA AUTORA

MAIRA CAROLINE TERÇARIOL – nascida em 12 de maio de 1994, na cidade de Mirandópolis (SP). Concluiu o ensino médio em dezembro de 2011, na escola EMEF Joaquim Franco de Mello – Lavínia (SP). Em março de 2012 iniciou o curso de graduação em Engenharia Agrônômica pela Universidade Estadual Paulista (UNESP), câmpus de Ilha Solteira. Foi bolsista PIBIC/CNPq no período de julho de 2013 a abril de 2016 e bolsista FAPESP de maio a dezembro de 2016. Em julho de 2017 iniciou o curso de Mestrado no Programa de Pós-graduação em Agronomia (Ciência do Solo), na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV), UNESP, Campus de Jaboticabal. Durante o mestrado foi bolsista CAPES e desde novembro de 2018 trabalha em usina de produção de açúcar e álcool como trainee agrícola.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me conceder a oportunidade de entrar no mestrado, pelos momentos proporcionados dentro dele, pela vida que tenho, por colocar pessoas boas em meu caminho e pela saúde e proteção.

Aos meus pais, Dorival e Luzia, por sempre me apoiarem e me guiarem em todas as minhas jornadas.

Agradeço à CAPES por fazer esse sonho se tornar realidade. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de financiamento 001.

Aos professores da FCAV/UNESP – Jaboticabal, por me proporcionarem excelentes aprendizado e preparação profissional, principalmente à Professora Mara Cristina Pessoa da Cruz, pela paciência, confiança, auxílio, e por transmitir seus conhecimentos, que pude colocar em prática em todos os experimentos realizados posteriormente.

Aos meus amigos e companheiros de trabalho do Laboratório de Fertilidade do Solo, Nayane, Roberta, Lucas, Denise, Adriano, Amanda, Kamila, Aline, Gilberto e Samira por sempre me proporcionarem conforto e por serem minha família em Jaboticabal.

Obrigada!

Sumário

RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1 Plantas de cobertura	3
2.2 Carbono orgânico total e lábil em função de plantas de cobertura.....	4
2.3 Nitrogênio orgânico total e potencialmente mineralizável em função de plantas de cobertura.....	7
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	10
3.1 Delineamento experimental e tratamentos.....	10
3.2 Implantação, tratos culturais e manejo	10
3.3 Coleta de solo e atributos avaliados	11
3.3.1 Carbono orgânico total (COT)	11
3.3.2 Carbono oxidável (COx).....	12
3.3.3 Índice de manejo do carbono (IMC) obtido por cálculo.....	12
3.3.4 Nitrogênio total (NT).....	13
3.3.6 Nitrogênio orgânico mineralizável	14
a) por hidrólise alcalina usando destilação a vapor direta (DVD)	14
b) por oxidação com solução de KMnO_4 0,033 mol L ⁻¹	14
3.4 Análise estatística dos dados.....	15
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	15
4.1 Carbono total e formas lábeis de carbono no solo em função de plantas de cobertura e doses de nitrogênio	15
4.1.2 Carbono orgânico total.....	15
4.1.2 Carbono orgânico oxidável (COx) e Índice de manejo do carbono (IMC)	17
4.2 Nitrogênio total, mineralizável e mineral em função de plantas de cobertura	21
4.2.1 Nitrogênio total.....	21
4.2.2 Nitrogênio orgânico mineralizável em função de plantas de cobertura e de doses de nitrogênio	22
b) Nitrogênio orgânico mineralizável obtido por hidrólise alcalina (N-DVD).....	25
4.2.4 Nitrogênio mineral.....	26
4.3 Correlações entre N absorvido pelo milho e formas de C e N do solo	27
5. CONCLUSÕES	28
6. REFERÊNCIAS	28

FORMAS LÁBEIS DE CARBONO E NITROGÊNIO NO SOLO EM FUNÇÃO DE PLANTAS DE COBERTURA E ADUBAÇÃO NITROGENADA

RESUMO – O cultivo de plantas de cobertura aumenta os teores e altera as formas de carbono e nitrogênio do solo, o que melhora a qualidade do solo. Assim, o objetivo com o presente estudo foi avaliar os efeitos do manejo do solo, associando plantas de cobertura em pré-safra de milho e doses de nitrogênio no milho, nas formas lábeis do carbono e do nitrogênio orgânico do solo, dezessete anos após a implantação do sistema. O experimento foi instalado no ano de 2000, em área experimental da FCAV-Unesp, Campus de Jaboticabal (SP), em Latossolo Vermelho distrófico textura argilosa. O experimento foi instalado em delineamento em blocos casualizados com parcelas subdivididas e quatro repetições. Os tratamentos principais são as plantas de cobertura feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis*), mucuna-cinza (*Mucuna cinerea*), milheto (*Pennisetum americanum*) e vegetação espontânea (pousio), e os tratamentos secundários são quatro doses de N-ureia (0, 60, 120 e 180 kg ha⁻¹ de N). No início da safra 2015/2016 foi feita coleta de solo na profundidade de 0-10 cm e nas amostras foram avaliados carbono e nitrogênio totais, as formas lábeis de carbono extraídas com solução de permanganato de potássio, as formas minerais de N e o N orgânico mineralizável extraído com solução de permanganato de potássio e por hidrólise alcalina. Independentemente da espécie de planta de cobertura utilizada, milheto, mucuna-cinza ou feijão-de-porco, houve aumento no carbono orgânico total e no C lábil obtido por extração com solução de permanganato de potássio. Houve também aumento no índice de manejo do carbono com o cultivo das plantas de cobertura (milheto, mucuna-cinza e feijão-de-porco), o que indica ganho de qualidade do solo. A adubação nitrogenada em cobertura no milho cultivado após as plantas de cobertura não beneficia o acúmulo de N total, mas tende a aumentar as formas orgânicas mineralizáveis.

Palavras-chave: plantio direto, leguminosas, gramíneas, indicadores de qualidade do solo, C e N oxidáveis por permanganato, matéria orgânica.

LABILE FORMS OF CARBON AND NITROGEN IN SOIL AS A RESULT OF COVER CROPS AND NITROGEN FERTILIZATION

ABSTRACT - The cultivation of cover crops increases the levels and changes the forms of carbon and nitrogen in the soil, which improves the quality of the soil. Thus, the objective with the present study was to evaluate the effects of soil management, associating cover crops in pre-harvest corn and sidedress nitrogen doses in corn, in the labile forms of carbon and nitrogen of soil, seventeen years after implantation of the system. The experiment has been installed in 2000, in an experimental area of FCAV-Unesp, Jaboticabal (SP), Brazil, in a dystrophic clayey Oxisol. The experimental design is in randomized blocks with split plots and four replications. The main treatments are the cover crops: jack bean (*Canavalia ensiformis*), velvet beans (*Mucuna cinerea*), millet (*Pennisetum americanum*) and spontaneous vegetation (fallow), and as secondary treatments there are four doses of urea-N (0, 60, 120 and 180 kg ha⁻¹ of N). At the beginning of the 2015/2016 season, soil was collected at a depth of 0-10 cm and samples were evaluated for total carbon and nitrogen, plus the labile forms of carbon extracted with potassium permanganate solution, the mineral forms of N and the mineralizable organic N extracted with potassium permanganate solution and by alkaline hydrolysis. Regardless of the type of cover plant used, millet, velvet bean or jack bean, there was an increase in the total organic carbon and in the labile organic carbon obtained by extraction with potassium permanganate solution. There was also an increase in the carbon management index with the cultivation of cover crops (millet, velvet bean and jack bean), which indicates a gain in soil quality. Nitrogen fertilization in maize grown after cover crops does not benefit the soil total N, but shows an increase in mineralizable organic forms.

“Keywords:” no-tillage, grasses, legumes, soil quality indicators, permanganate oxidizable C and N, organic matter.

1. INTRODUÇÃO

O uso de plantas de cobertura é uma prática utilizada em sistemas conservacionistas de manejo do solo e influencia nos atributos do solo. Com a adoção destes sistemas pode ocorrer aumento nos estoques de carbono e diminuição da dependência de uso dos adubos nitrogenados. O uso combinado de plantas de cobertura e de doses ajustadas de adubos nitrogenados pode favorecer o acúmulo de carbono mais do que cada prática isoladamente, o que resulta em maior ganho de qualidade do solo e pode contribuir mais eficientemente com a diminuição dos custos de produção durante as safras.

O aumento do carbono total do solo pelo cultivo das plantas de cobertura é provavelmente o efeito mais desejado, mas ele só ocorre em longo prazo. Nos solos em que se cultivam espécies de cobertura, ao mesmo tempo em que há acúmulo de substâncias orgânicas complexas, de alto peso molecular e alto grau de recalcitrância ou resistência à decomposição, ocorre também a entrada de grande quantidade de compostos orgânicos menos estáveis, que compõe a fração lábil da matéria orgânica do solo. Nesta fração lábil admite-se a existência de um conjunto de compostos de fácil mineralização pela microbiota do solo, que interfere nas espécies e na população microbiana e, portanto, na velocidade de reciclagem dos nutrientes de plantas, particularmente do nitrogênio.

O cultivo de plantas de cobertura vem sendo bastante estudado como agente de melhoria de qualidade do solo avaliada pelas alterações nos estoques totais e nas formas lábeis de C e N. No entanto, o assunto é inesgotável porque as respostas dependem das espécies cultivadas, da cultura principal, do tipo de solo e das condições climáticas. A resposta depende, inclusive, do fornecimento de N para a cultura principal, que é função da espécie usada como cobertura, gramínea ou leguminosa.

Deste modo, o estudo detalhado das frações de C e N em solos cultivados com gramíneas e leguminosas de cobertura em pré-safra, combinando variação de doses de N na cultura principal, pode ajudar a identificar qual a planta de cobertura que mais contribui para a melhoria da qualidade do solo e tem maior potencial para disponibilizar nitrogênio, e qual a melhor dose de nitrogênio que pode ser associada

à espécie de cobertura. Assim, empregando amostras de experimento de longa duração com plantas de cobertura e doses de N, foram avaliadas formas de carbono e nitrogênio indicadoras de qualidade do solo e do fornecimento potencial de N, considerando as seguintes hipóteses:

- (i) As espécies de plantas usadas como cobertura interferem diferentemente no total acumulado e nas formas lábeis de C e do N.
- (ii) As doses de N aplicadas na cultura principal interferem, em longo prazo, no total acumulado e nas formas lábeis de C e N.
- (iii) As formas lábeis de C e N explicam o comportamento de absorção de N pela cultura principal em sistemas de sucessão de gramíneas ou leguminosas de cobertura/milho.

O objetivo geral com este estudo foi avaliar os efeitos do manejo do solo, associando plantas de cobertura em pré-safra de milho e doses de nitrogênio no milho, nas frações lábeis do carbono e do nitrogênio orgânico do solo, dezessete anos após a implantação do sistema. Os objetivos específicos foram:

- (i) avaliar o C total do solo e o C oxidável pelo método de permanganato de potássio;
- (ii) avaliar o índice de manejo do carbono em relação a área de mata nativa local;
- (iii) avaliar o N total no solo, o N orgânico mineralizável pelo método do permanganato de potássio e por hidrólise alcalina usando o método da destilação a vapor direta (N-DVD), e o N mineral do solo (N-NH_4^+ e N-NO_3^-);
- (iv) avaliar as relações entre as frações de C e N do solo e o N absorvido pela cultura do milho em sucessão a plantas de cobertura.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Plantas de cobertura

As plantas de cobertura substituem o pousio durante algum período do ano, o que é benéfico em muitos aspectos relacionados à qualidade do solo (Poeplau e Don, 2015; Blanco-Canqui et al., 2015; Nivelles et al., 2016). Elas não reduzem necessariamente a quantidade de produtos agrícolas que deveriam ser adicionados no solo, mas se forem cultivadas leguminosas fixadoras de nitrogênio, pode haver diminuição na dose de adubo nitrogenado para a cultura principal nas próximas safras.

A inclusão de plantas de cobertura nos sistemas de manejo é uma ferramenta importante para aumentar o teor de matéria orgânica dos solos (MOS). Além disso, elas contribuem para quebrar os ciclos de pragas e doenças (Ludwig e Meyhöfer, 2016) e para favorecer o crescimento de populações benéficas de microrganismos no solo (Mbuthia et al., 2015; Nivelles et al., 2016).

O uso de plantas de cobertura é uma ferramenta importante em áreas de plantio direto, e alguns estudos mostraram que as culturas de cobertura reduzem os efeitos da compactação do solo, aumentam a infiltração e a capacidade de retenção de água do solo, principalmente devido ao aumento da MOS (Brandan et al., 2017; Lewis et al., 2017).

A escolha das espécies de plantas de cobertura é um fator determinante no sucesso da melhora da qualidade do solo. De acordo com Ohland et al. (2005), o cultivo de leguminosas antecedendo o milho aumenta a disponibilidade de nitrogênio no solo. As leguminosas são preferidas exatamente pela capacidade de fixação biológica de nitrogênio, pelo sistema radicular profundo, elevada produção de biomassa e relação C/N mais baixa, favorável à decomposição (Silva et al., 2009).

As gramíneas, por sua vez, apresentam maior volume de raízes que as leguminosas, proporcionando melhora na porosidade e agregação do solo, mas de modo geral, apresentam relação C/N maior. Espécies de gramíneas com relação C/N alta apresentam baixa taxa de decomposição e oferecem maior proteção do solo durante todo o ciclo do milho (Sá, 1996). Com o consórcio de leguminosas e gramíneas é possível obter uma combinação de resíduos com relação C/N

intermediária àquela das espécies em culturas solteiras, conforme demonstraram Ranells e Waggoner (1996), mas o manejo dos consórcios é muito mais difícil.

Apesar dessas vantagens, as plantas de cobertura geralmente não são amplamente utilizadas pelos agricultores, principalmente devido aos custos adicionais e à exigência de mão de obra no campo (Santos et al., 2010). Além disso, os efeitos das culturas de cobertura na produtividade, nutrição das culturas ou controle de ervas daninhas são variáveis e dependem das espécies escolhidas, do tipo de solo e do clima local (Blanco-Canqui et al., 2015).

Dados os efeitos negativos da predominância da monocultura nas principais regiões agrícolas do Brasil e em outras partes do mundo, é importante estudar estratégias agrícolas alternativas orientadas para a produção de culturas de alto rendimento sem comprometer os recursos naturais e o funcionamento dos ecossistemas. O emprego de certas espécies vegetais como plantas de cobertura no período de pousio representa uma maneira eficiente de diversificar os sistemas agrícolas.

Baseado nisso, é importante avaliar até que ponto as culturas de cobertura são capazes de dar retorno em termos de ganho de fertilidade do solo, e quanto de adubo precisa ser adicionado para manter o sistema em equilíbrio, com manutenção ou ganho de rendimento. No Estado de São Paulo, devido ao predomínio do monocultivo de cana-de-açúcar, não há experiência suficiente com cultivo de espécies de cobertura em áreas de produção de cereais. Considerando que São Paulo é o segundo maior produtor de milho entre os Estados da Região Sudeste, é importante ter pesquisas que definam quais as melhores alternativas de espécies de plantas de cobertura e como elas alteram a qualidade do solo quando em rotação com milho.

2.2 Carbono orgânico total e lábil em função de plantas de cobertura

Os teores de COT variam em função de uma série de fatores, que podem ser agrupados em: (i) variáveis como precipitação pluvial e temperatura; (ii) condições do solo, incluindo várias propriedades físico-químicas; e (iii) quantidade e qualidade do carbono orgânico que entra no solo. Esses fatores trabalham juntos para regular a dinâmica do carbono orgânico do solo (Luo et al., 2017).

O teor de MOS de cada ecossistema, cultivado ou não, resulta do balanço entre as taxas de adição e de perda. As adições ocorrem via resíduos de plantas e de animais que retornam ao solo, e as perdas acontecem por oxidação do carbono a CO_2 na respiração microbiana, por erosão e por percolação. Apesar de estarem envolvidos processos extremamente dinâmicos, em todos os ecossistemas é atingido um ponto de equilíbrio entre as taxas de adição e perda, denominado estado estável, no qual o teor de MOS mantém-se inalterado. Se houver mudança nas práticas de manejo, o teor de MOS será alterado, até atingir um novo estado estável, ou ponto de equilíbrio (Meurer, 2012).

Os reservatórios de carbono orgânico dos solos do mundo, ocupados com sistemas agrícolas, diminuíram de 25 a 75%, e um dos responsáveis por isto é o manejo do solo (Lal, 2011). A diminuição desses estoques é ruim por afetar negativamente os atributos físicos, químicos e biológicos do solo, prejudicando o desenvolvimento das culturas.

A matéria orgânica do solo tem papel fundamental na definição da qualidade do solo (Bünneman et al., 2018), pois é a principal responsável pelo fornecimento de grande parte dos nutrientes para as plantas, com papel no armazenamento e ciclagem de nutrientes, na estruturação do solo, na resistência a erosão e em processos biológicos importantes, como a mineralização do nitrogênio (Weil e Magdoff, 2004).

Embora as mudanças no COT raramente ocorram em curto prazo, as frações com maior probabilidade de serem afetadas, em curto prazo, são as frações orgânicas lábeis, associadas aos resíduos das culturas nos estágios iniciais da decomposição (Duval et al., 2016).

O carbono lábil é a fração de carbono orgânico mais ativa, que pode ser usada como indicadora de qualidade do solo de curto prazo, pois é sensível a mudanças induzidas pelo manejo (Rovira et al., 2010; Souza et al., 2016a). A forma mais usada de medir o carbono orgânico lábil é por oxidação por 12 minutos com solução de permanganato de potássio diluída (Weil et al., 2003) e esta forma será referida neste texto pela sigla COx.

A labilidade do carbono é calculada a partir da razão entre carbono lábil (COx) e não lábil (Blair et al., 1995), com os quais é possível calcular o índice de manejo

de carbono (IMC). O IMC avalia a eficiência do manejo que está sendo usado no solo cultivado em relação às suas características naturais ou originais. Vários pesquisadores (Vieira et al., 2007; Ghosh et al., 2016; Sá et al., 2018) relataram o IMC como um indicador precoce de alterações na qualidade do solo devido a práticas de manejo e, portanto, com o seu uso foi possível avaliar as melhores práticas de manejo, que minimizam a degradação do solo. Deste modo, a avaliação do carbono lábil e do IMC podem ser aplicadas em áreas de cultivo de plantas de cobertura para ajudar a selecionar as melhores espécies de plantas, regionalmente.

Dentre as culturas de cobertura mais usadas pelo seu potencial de produção de fitomassa têm-se o feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis*), as mucunas e o milheto (*Pennisetum glaucum*)

O feijão-de-porco é uma leguminosa rústica, tolerante a altas temperaturas e à seca. Adapta-se a todos os tipos de solo, inclusive aqueles pobres em fósforo (Teixeira et al., 2010). Essa cultura tem potencial produtivo de até 5,5 t ha⁻¹ de matéria seca da parte aérea (Maia et al., 2013).

Em experimento com adubação de cobertura utilizando o feijão-de-porco, foi observado aumento do carbono lábil (Oliveira et al., 2016) e do carbono orgânico total (Albuquerque et al., 2005) nas primeiras camadas do solo. Em outro estudo foi observado que o feijão-de-porco apresenta sistema radicular profundo, sendo capaz de aumentar o teor de MOS em 26% em relação ao plantio convencional de videira (*Vitis vinifera*) (Faria et al., 2004).

As mucunas são leguminosas que apresentam desenvolvimento vegetativo muito rápido e que são resistentes à baixa disponibilidade hídrica e a solos com baixa fertilidade, podendo ser utilizadas em solos degradados (Okito et al., 2004). A mucuna-cinza (*Mucuna cinerea*) é resistente à seca, adaptada aos solos ácidos e tem potencial produtivo de até 9 t ha⁻¹ de matéria seca da parte aérea (Calegari, 1992; Wutke, 1993). Segundo Teodoro et al. (2011), as leguminosas feijão-de-porco e mucuna-cinza são as espécies mais promissoras para a adubação verde, devido à elevada produção de matéria seca.

Albuquerque et al. (2005) avaliando diferentes espécies de planta de cobertura (guandu-anão, mucuna-cinza, feijão-de-porco, soja-preta) em consórcio com milho, verificaram que a mucuna resultou nas maiores médias de COT do solo,

ficando na frente da cultura de feijão-de-porco. Em outros estudos foi definido que a mucuna é uma alternativa para o sequestro de carbono e melhoria da qualidade do solo no Cerrado (Carvalho et al., 2014).

O milheto fornece palhada mais duradoura na superfície do solo e, com seu sistema radicular mais desenvolvido, que pode alcançar mais de 2,0 m, absorve nutrientes em maiores profundidades, extraindo e reciclando nutrientes não absorvidos pelas culturas anuais, que têm raízes menos profundas (Alvarenga et al., 2001). Em São Paulo, Muraishi et al. (2005) obtiveram produção de 6.780 kg ha⁻¹ de massa seca de milheto.

Segundo Guimarães et al. (2018), o cultivo de milheto consorciado com culturas em sistemas convencionais levou aos maiores valores de IMC, apontando o milheto como a planta de cobertura mais favorável ao estoque de carbono no solo. Em outros trabalhos, foi observado que o milheto promoveu os maiores teores de carbono nas frações húmicas (Souza et al., 2016), e quando cultivado na sucessão soja-milheto, mesmo com o uso de gradagens pesadas, não houve redução nos teores de COT, ao longo do tempo (Caetano et al., 2013).

A adoção do cultivo de plantas de cobertura é uma prática de manejo que pode devolver ao solo parte do que foi perdido ao longo de décadas de cultivo convencional, pois do ponto de vista da fertilidade do solo, aumenta o teor de matéria orgânica na camada mais superficial, por deixar resíduos da planta sobre o solo.

2.3 Nitrogênio orgânico total e potencialmente mineralizável em função de plantas de cobertura

O manejo eficiente do nitrogênio no solo é um dos pontos mais importantes para obter produção agrícola lucrativa e sustentável. Quando o N fertilizante excede a demanda de N da safra, a lucratividade da fazenda é comprometida e o risco de lixiviação de N nas águas subterrâneas aumenta (Cameron et al., 2013; Teixeira et al., 2016).

Diante desse contexto, as culturas de cobertura já foram bastante enfatizadas na literatura por reduzirem a lixiviação de nitrato em diferentes regiões (Salmerón et al., 2010, Gabriel et al., 2012), o que as torna uma ferramenta importante para

reduzir o risco de poluição de águas subterrâneas (Gabriel et al., 2016; Teixeira et al., 2016).

As culturas de cobertura influenciam a ciclagem do N ao acumular o N através da absorção das plantas e, subsequentemente, ao terem o N imobilizado nos restos culturais mineralizado pelos microrganismos durante a estação de crescimento seguinte (Thilakarathna et al., 2014). A imobilização de N por gramíneas reduz diretamente o N mineral do solo, minimizando a lixiviação de nitratos durante os períodos de altos níveis de movimento descendente da umidade no solo (Salmerón et al., 2010). Nem todo N imobilizado nos tecidos vegetais é prontamente mineralizado: uma parte fica nas formas mais lábeis da matéria orgânica do solo e pode mineralizar em curto prazo, e outra parte passa a integrar a fração recalcitrante da matéria orgânica, cuja mineralização ocorre em longo prazo.

Por ser um reservatório direto de frações lábeis, prontamente disponíveis, o N lábil é particularmente importante, pois exerce controle considerável no funcionamento do ecossistema, podendo alterar tanto a produtividade quanto a estrutura da comunidade dos ecossistemas (Belay-Tedla et al., 2009). Tais alterações causam mudanças no tamanho e na distribuição dos reservatórios lábeis e recalcitrantes, que podem não apenas elevar as novas condições em curto prazo, mas também podem influenciar no armazenamento de C e N no solo em longo prazo (Zhang et al., 2016).

Apesar de existir literatura abundante a respeito das implicações do uso das plantas de cobertura e da adubação nitrogenada na qualidade do solo, há pouca informação sobre a influência desses fatores nas frações de carbono, e principalmente, nas frações do nitrogênio em longo prazo. Entretanto, sabe-se que com o aumento dos teores de carbono orgânico nas primeiras camadas, ocorre aumento do carbono lábil, que conseqüentemente aumenta o nitrogênio disponível do solo (Beltrán et al., 2018).

O N potencialmente disponível no solo é uma fração pequena do nitrogênio orgânico total derivada de frações lábeis que podem ser mineralizadas pela fauna microbiana, e que, neste processo, transformam-se em formas químicas absorvidas pelas plantas (Nivelle et al., 2016). A medida do N disponível pode ser feita empregando vários métodos, apoiados na extração com soluções salinas, alcalinas

ou oxidantes. As soluções salinas foram as mais indicadas durante muito tempo, particularmente a extração com solução de KCl a quente (Gianello e Bremner, 1986; Gianello et al., 2000). Mais recentemente, a hidrólise alcalina ganhou espaço, particularmente com os métodos Illinois Soil Nitrogen Test (ISNT) e destilação a vapor direta (DVD) (Khan et al., 2001; Bushong et al., 2008; Roberts et al., 2009). O uso de soluções oxidantes, como a de permanganato de potássio (Shang e Tiessen, 1997) não é tão frequentemente citado, mas se é admitida sua eficiência para oxidar o COL, e é estabelecida relação entre COL e potencial de liberação de nitrogênio em curto prazo para as culturas, pode-se pensar em usá-las para avaliação do N orgânico mineralizável.

O conteúdo de N-lábil e mineralizável pode aumentar no solo com o consórcio entre culturas, principalmente pela sucessão de plantas de cobertura (Aita e Giacomini et al., 2003; Acosta et al., 2014; Beltrán et al., 2018). Segundo Souza e Melo (2000), quando é realizada a rotação de culturas entre plantas de cobertura e milho, a quantidade de nitrogênio potencialmente mineralizável, avaliada por incubação anaeróbica após sete dias, aumenta em quase 50% no solo.

Embora as frações lábeis de N orgânico representem até 20% do total de N do solo, apenas 9 a 10% desse N é potencialmente mineralizável (Sharifi et al., 2011). Isso implica que algumas frações de N orgânico lábil são mais suscetíveis à mineralização do que outras e, portanto, contribuem mais para a quantidade de N mineral no solo (Thomas et al., 2015).

O teor de N mineral no solo (N-NH_4^+ e N-NO_3^-) é a quantidade de N disponível no solo que vai ser prontamente absorvido pelas plantas (Zhang et al., 2016). Em trabalho realizado por Collier et al. (2011) foi observado que 60 dias são suficientes para que ocorra a mineralização da metade do N contido na parte aérea do feijão-de-porco. No mesmo estudo, os autores avaliaram doses de N na adubação do milho em sucessão ao feijão-de-porco, e concluíram que não houve necessidade de doses altas de N para a cultura do milho, porque o N fixado pela leguminosa foi rapidamente disponibilizado.

As plantas de cobertura são, deste modo, soluções sustentáveis para melhorar a qualidade do solo, e se leguminosas, podem diminuir a quantidade de fertilizantes nitrogenados em cultivos convencionais.

3. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi instalado em área da FCAV-Unesp Câmpus de Jaboticabal-SP, localizada a 21°15'22" de latitude Sul e 48°16'43" de longitude Oeste. O clima, de acordo com o Sistema Internacional de Classificação de Koppen, é do tipo Aw (Alvares et al., 2013). A precipitação pluvial anual média é de 1.285 mm e a temperatura média é de 22,4°C. O solo do local é Latossolo Vermelho distrófico, típico, textura argilosa (Andrioli e Centurion, 1999).

A área onde foi instalado o experimento vem sendo cultivada sem revolvimento do solo desde a safra 1998/99. No segundo semestre de 2000 iniciou-se experimento utilizando plantas de cobertura, em pré-safra a cultura do milho. Na caracterização química do solo da camada de 0 a 20 cm, em amostra coletada antes da instalação do experimento, foram obtidos: P resina 58 mg dm⁻³, MO 20 g dm⁻³, pH em CaCl₂ 4.5, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, acidez total H⁺+Al e CTC, respectivamente de 3.1, 13, 6, 47 e 69 mmol_c dm⁻³ e V% 32. Os métodos utilizados nas análises químicas estão descritos em Raij et al. (2001).

3.1 Delineamento experimental e tratamentos

O delineamento do experimento é em blocos casualizados com parcelas subdivididas, com quatro repetições. Os tratamentos principais são as culturas de cobertura em pré-safra à cultura do milho: feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis*), mucuna-cinza (*Mucuna cinerea*), milheto (*Pennisetum americanum*) e vegetação espontânea (pousio). Os tratamentos secundários são quatro doses de N em cobertura na cultura do milho (0, 60, 120 e 180 kg ha⁻¹ de N) que foram aplicadas em todos os anos do experimento, na forma de ureia. As parcelas apresentam área total de 126 m² (18 m x 7 m) e, as subparcelas, de 31,5 m² (4,5 m x 7 m). Todas as espécies foram semeadas mecanicamente com espaçamento de 0,45 m nas entrelinhas em sistema de plantio direto, e a quantidade de sementes por metro linear foi de 4, 50 e 5, respectivamente de mucuna, milheto e feijão-de-porco.

3.2 Implantação, tratos culturais e manejo

Em todos os anos agrícolas (de 2000/2001 a 2015/2016), as plantas de cobertura foram semeadas em setembro ou outubro e dessecadas em dezembro ou

janeiro e, em seguida, foi feita a semeadura do milho. As plantas de cobertura não foram adubadas ao longo dos anos.

Na safra 2015/2016 as culturas de cobertura foram semeadas em sistema plantio direto, como nos anos anteriores. Todas as espécies foram semeadas 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 Coleta de solo e atributos avaliados

A amostragem de solo foi realizada na profundidade de 0-0,10 m, 30 dias após a dessecação das plantas de cobertura e antes da adubação em cobertura do milho. Para a obtenção da amostra composta foram coletadas 10 subamostras nas entrelinhas da cultura de milho. Além da amostragem descrita também foi feita coleta de solo em área de mata próxima ao experimento (camada de 0-0,10m), em que se tem o mesmo tipo de solo e a mesma condição climática. As amostras foram secas ao ar, passadas em peneira de 2 mm de abertura de malha, homogeneizadas e armazenadas para posterior análise.

3.3.1 Carbono orgânico total (COT)

O carbono orgânico total foi analisado pelo método de Walkley e Black (1934), que consiste na oxidação do carbono em 1 g de solo, em erlenmeyer de 250 mL, com 10 mL de solução de dicromato de potássio $0,167 \text{ mol L}^{-1}$ e 20 mL de ácido sulfúrico concentrado. Após a adição dos reagentes a mistura foi agitada por 1 min, mantida em repouso por 30 min e, em seguida, foram adicionados 200 mL de água deionizada. Essa solução foi filtrada em papel filtro qualitativo, coletando o filtrado em erlenmeyer de 500 mL. Após adição de 10 mL de ácido orto-fosfórico concentrado e 3 gotas de solução de difenilamina (10 g L^{-1} em H_2SO_4 concentrado) o extrato foi titulado com solução de sulfato ferroso amoniacal ($0,4 \text{ mol L}^{-1}$) até viragem da cor azul púrpura para verde. O procedimento e o cálculo seguiram o que está descrito em Raij et al. (2001)

3.3.2 Carbono oxidável (COx)

O COx foi analisado pelo método do permanganato de potássio (Weil et al., 2003), que consiste na oxidação do C de 2,5 g de solo empregando 2 mL de solução de permanganato de potássio 0,2 mol L⁻¹ mais 18 mL de água deionizada. Após agitação por 2 min na rotação de 240 oscilações por minuto, as amostras foram deixadas em ambiente escuro e mantidas em repouso durante 10 min. Concluído o repouso, foi retirada uma alíquota de 0,5 mL do sobrenadante, que foi colocada em tubo de ensaio, ao qual foram adicionados 19,5 mL de água deionizada. Após homogeneizar o meio em agitador vórtex foi realizada a leitura do carbono oxidável em espectrofotômetro, no comprimento de onda de 550 nm. A conversão dos resultados foi feita com base em curva padrão feita diariamente, em cada data de avaliação.

3.3.3 Índice de manejo do carbono (IMC) obtido por cálculo

Após a obtenção dos resultados nas análises de solos, foi realizado o cálculo do índice de manejo do carbono (IMC) a partir do COT e do COx, segundo Blair et al. (1995), usando as equações 1, 2, 3 e 4:

$$\text{IMC} = \text{IPC} \times \text{ILC} \times 100 \quad (\text{Equação 1})$$

Para o cálculo do IMC é necessário calcular o índice do *pool* de carbono (IPC) é calculado a partir do carbono orgânico total presente no tratamento e do carbono orgânico do solo da referência (mata), e calculado conforme:

$$\text{IPC} = \text{COT}_{\text{trat}}/\text{COT}_{\text{ref}} \quad (\text{Equação 2})$$

em que COT_{trat} = carbono orgânico do solo em dado tratamento, e COT_{ref} = carbono orgânico do solo a partir da referência (mata nativa).

O índice de labilidade do carbono (ILC) é calculado pela razão da labilidade no tratamento e na referência, conforme:

$$\text{ILC} = L_{\text{trat}}/L_{\text{ref}} \quad (\text{Equação 3})$$

em que L se refere à razão entre o conteúdo de carbono lábil e não lábil do solo (concentração de COT menos a quantidade de carbono lábil), calculado como:

$$L = \text{concentração de C lábil}/\text{concentração de C não lábil} \quad (\text{Equação 4})$$

3.3.4 Nitrogênio total (NT)

O nitrogênio total foi determinado segundo Tedesco et al. (1995). Neste método, o N orgânico é convertido em NH_4^+ por digestão sulfúrica e o NH_4^+ é determinado, após destilação e conversão a NH_3 , por titulação com solução de H_2SO_4 . Nesta determinação foi feita pesagem de 0,1 g de solo passado em peneira de 100 mesh (150 μm) e transferência para tubo de digestão, ao qual foram adicionados 1 mL de H_2O_2 300 mL L^{-1} e 7 mL de mistura digestora (H_2SO_4 concentrado, água deionizada, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, SeO_2 e Na_2SO_4). Após digestão a frio por uma noite, foi feita digestão em bloco digestor, iniciando a 100 °C por 30 min. A cada 30 min a temperatura foi aumentada em 50 °C até atingir 300 °C e, depois, 330 °C, na qual permaneceu por 2 horas. Após clareamento e resfriamento do extrato ele foi transferido para tubo de destilação com auxílio de 20 mL de água deionizada. O tubo foi conectado ao destilador e foram adicionados 15 mL de solução de NaOH 10 mol L^{-1} . A destilação foi realizada por arraste de vapor, em destilador de Kjeldahl, coletando a amônia em béquer de 50 mL contendo 10 mL de solução de H_3BO_3 20 g L^{-1} com indicador, finalizando a destilação após a coleta de 40 mL de destilado (cerca de 5 min). O destilado foi titulado com solução de H_2SO_4 0,02 mol L^{-1} em titulador automático.

3.3.5 Nitrogênio mineral (N-NH_4^+ e N-NO_3^-)

O procedimento usado está descrito em Cantarella e Trivelin (2001) e está baseado na extração das formas inorgânicas de nitrogênio com solução de KCl 1 mol L^{-1} , seguida de destilação por arraste de vapores e quantificação por meio de titulação. Para erlenmeyer com capacidade para 250 mL foram transferidos 4g de solo e 40 mL de solução de KCl 1 mol L^{-1} . A suspensão foi agitada por 60 min em agitador com movimento circular-horizontal. Após a agitação, foram aguardados 90 min de repouso para decantação e alíquota de 30 mL do sobrenadante foi transferida para tubos de destilação com entrada lateral fechada com tampa de rosca. Na destilação, após encaixe do tubo ao destilador, adicionou-se 0,2 g de MgO p.a. por meio da entrada lateral, usando medida calibrada. Na saída do condensador

do destilador foi colocado erlenmeyer com capacidade para 125 mL, contendo 10 mL de solução de H_3BO_3 20 g L^{-1} e foi feita a destilação até obter 50 mL do destilado, em aproximadamente 5 min. Em seguida, outro erlenmeyer com capacidade para 125 mL contendo 10 mL de solução de H_3BO_3 foi colocado na saída do condensador, e 0,2 g de liga de Devarda foi adicionado pela entrada lateral do tubo, com auxílio de medida calibrada, para redução do N-NO_3^- a N-NH_3 . Fez-se nova destilação, coletando 50 mL de destilado. A quantificação do N foi feita por titulação com solução de H_2SO_4 0,0025 mol L^{-1} padronizada, usando titulador automático.

3.3.6 Nitrogênio orgânico mineralizável

Foram aplicados dois métodos de determinação de nitrogênio orgânico mineralizável às amostras de solo: (i) destilação a vapor direta, um dos métodos mais frequentemente avaliados na literatura, no qual se emprega hidrólise alcalina; e (ii) oxidação com solução de permanganato de potássio, para testar a viabilidade do extrator de C orgânico lábil para o N orgânico mineralizável, uma vez que a mesma alíquota de permanganato pode ser utilizada para ambos, diminuindo assim os custos e o tempo das análises.

a) por hidrólise alcalina usando destilação a vapor direta (DVD)

O nitrogênio orgânico mineralizável foi extraído pelo método de destilação a vapor direta, conforme Bushong et al. (2008) e Roberts et al. (2009). A hidrólise alcalina foi feita empregando 1 g de solo em tubo de destilação, ao qual foram adicionados 10 mL de solução de NaOH 10 mol L^{-1} . Em um béquer de 50 mL contendo 10 mL de solução de H_3BO_3 20 g L^{-1} , foi feita coleta de 40 mL de destilado (cerca de 5 min). O destilado foi titulado com solução de H_2SO_4 0,02 mol L^{-1} em titulador automático.

b) por oxidação com solução de KMnO_4 0,033 mol L^{-1}

A extração com solução de permanganato de potássio foi de acordo com Shang e Tiessen (1997). A extração por oxidação foi feita empregando 1,0 g de solo e 25 mL de solução de KMnO_4 0,033 mol L^{-1} . A mistura foi agitada a 170 rpm por 1 hora, e centrifugada por 10 min, sempre protegida da luz. Após centrifugação,

colocaram-se 20 mL do sobrenadante em tubo de digestão e foi feita determinação do N por destilação. Em um béquer de 50 mL contendo 10 mL de solução de H_3BO_3 20 g L^{-1} , foram coletados 40 mL de destilado (cerca de 5 min). O destilado foi titulado com solução de H_2SO_4 0,02 mol L^{-1} em titulador automático.

3.4 Análise estatística dos dados

Os teores de carbono e de nitrogênio nas formas avaliadas foram submetidos a análise de variância pelo teste F e, em caso de significância, a comparação dos efeitos das plantas de cobertura foi feita pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade e os efeitos das doses de nitrogênio foram avaliados por regressão polinomial. Para avaliar a eficiência dos métodos químicos de determinação de C e N na previsão da disponibilidade de N, foram usados dados de N absorvido pelo milho obtidos por Bettiol (2018), trabalho esse que foi realizado e executado na mesma área experimental. Foi calculada a correlação de Pearson (r) entre as variáveis de solo e o N absorvido.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Carbono total e formas lábeis de carbono no solo em função de plantas de cobertura e doses de nitrogênio

4.1.2 Carbono orgânico total

Houve efeito ($P < 0,05$) das plantas de cobertura no teor de carbono orgânico total (COT) do solo (Tabela 1). Para esse indicador, o menor teor foi observado no tratamento pousio, mas as espécies de cobertura não diferiram, com aumento médio nos teores de COT de 2,0 g kg^{-1} , embora a mucuna não tenha apresentado diferença e relação ao pousio.

Tabela 1. Carbono orgânico do solo, em função de plantas de cobertura e doses de nitrogênio, na profundidade de 0-10 cm.

N kg ha ⁻¹	Carbono orgânico total, g kg ⁻¹ (COT)				
	Pousio	Milheto	Mucuna-cinza	Feijão-de-porco	Média ¹
0	12,11	12,99	12,65	13,90	13,16a
60	11,88	13,23	13,96	14,43	13,37a
120	11,43	14,76	13,21	13,65	13,26a
180	12,33	13,93	13,83	15,45	13,88a
Média ¹	11,94b	13,73a	13,66ab	14,36a	
		Teste F	CV%		
Plantas de cobertura		19,70**	6,97		
Doses de N		2,15 ^{NS}	6,52		
PC X DN		1,93 ^{NS}			

¹ Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. ** = significativo a 1% de probabilidade; ^{NS} = não significativo.

O efeito das plantas de cobertura está associado à maior deposição de fitomassa da parte aérea, que fica depositada sobre o solo após a dessecação, onde se transforma em matéria orgânica estável. Bettiol (2018) avaliou a produção de matéria seca das plantas na mesma área do experimento e mesmo ano em que foram determinados os teores de COT da Tabela 1, e obteve 1,3, 4,2, 5,9 e 16,6 t ha⁻¹, respectivamente para vegetação espontânea, mucuna-cinza, feijão-de-porco e milho. Em outros anos, o padrão de produção foi semelhante, com o tratamento pousio ou vegetação espontânea, sempre menor. Além disso, percebeu-se com esse trabalho um aumento de 15% de carbono orgânico em 17 anos. Gonçalves e Ceretta (1999) também relataram menor produção de massa seca e menor quantidade de carbono em áreas com plantas de crescimento espontâneo, em relação a planta de cobertura de tremoço azul (*Lupinus angustifolius*), e Lima et al. (2005) relataram maior produção de fitomassa de milho em experimentos curtos, de 12 meses. Guzmán et al. (2019) relataram que a vegetação espontânea apresentou baixa produção de biomassa e efeito moderado ou desprezível nas propriedades do solo em área de cultivo de videira.

A produção de matéria seca das plantas de cobertura nos anos agrícolas anteriores (Bettiol et al., 2018) pode ser usada para justificar a diferença entre pousio e as plantas de cobertura (Tabela 1), mas com base nos números apresentados, observa-se que com menor quantidade de fitomassa de feijão-de-porco e mucuna obtém-se a mesma quantidade de C estabilizado no solo. Este resultado está relacionado ao fato de o COT acumulado no solo não ser apenas em função da

quantidade, mas também da qualidade da fitomassa (Palm et al., 2001) e, deste modo, pode-se admitir que a qualidade da fitomassa das leguminosas favorece mais o acúmulo de COT do que a do milho a longo prazo, porque quanto maior a adição de resíduos orgânicos no solo, maior o aumento dos agregados de matéria orgânica do solo.

4.1.2 Carbono orgânico oxidável (COx) e Índice de manejo do carbono (IMC)

Os tratamentos relativos às plantas de cobertura e doses de N apresentaram diferenças estatísticas ($P < 0,05$) para o carbono oxidável (COx) do solo (Tabela 2). Porém, não houve interação entre ambas ($P > 0,05$). Os maiores teores de COx foram obtidos com o cultivo de milho e de leguminosas em relação ao pousio. No entanto, a mucuna não diferiu do pousio.

Tabela 2. Carbono oxidável por KMnO_4 , em função de plantas de cobertura e doses de nitrogênio, na profundidade de 0-10 cm.

N kg ha ⁻¹	Carbono-KMnO ₄ , mg kg ⁻¹ (COx)				
	Pousio	Milho	Mucuna-cinza	Feijão-de -porco	Média ¹
0	325,00	464,75	278,50	444,25	378,12
60	203,25	368,50	275,50	343,75	297,45
120	156,00	362,50	330,00	324,75	293,31
180	344,75	430,75	398,25	389,25	390,75
Média ¹	257,25c	406,62a	320,56bc	375,50ab	
		Teste F	CV%		
Plantas de cobertura		13,82**	9,66		
Doses de N		6,09**	11,58		
PC X N		0,98 ^{NS}			

¹ Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. ** = significativo a 1% de probabilidade; ^{NS} = não significativo.

Em estudos com avaliações de plantas de cobertura, o COx obtido por oxidação com solução de permanganato é considerado um dos melhores indicadores de qualidade do solo (Ladoni et al., 2016; Wang et al., 2017). Portanto, pode-se afirmar que nos estudos em que houve maior deposição de resíduos vegetais no solo, também houve maior labilidade de carbono e pode haver maior disponibilidade de nutrientes para o milho cultivado após as plantas de cobertura. Em alguns estudos não foram observados efeitos significativos de manejo e fertilização no COx (Ladoni et al., 2015; Margenot et al., 2017; Sequeira e Alley,

2011a; Bongiorno et al, 2019), o que difere do observado neste trabalho, em que o milho se destacou como a espécie que mais aumentou este atributo (Tabela 2).

Dentre os métodos de determinação de carbono lábil, a extração com solução de permanganato é o procedimento mais recomendado, pois exige menos tempo de avaliação e menor investimento, quando comparado a outros métodos de quantificação de carbono (Sequeira et al., 2011b; Hurisso et al., 2016).

Analisando os resultados de plantas de cobertura nas Tabelas 1 e 2, percebe-se que o milho foi a espécie que resultou nos maiores teores de COT e COx no solo, seguido da cultura de feijão-de-porco. Para estas espécies, o COx representou 2,96% e 2,60% do COT, com valores percentuais ligeiramente menores para mucuna-cinza e pousio, e respectivamente iguais a 2,35% e 2,15%. Os valores obtidos estão muito abaixo dos 20% de carbono orgânico lábil citados por Siqueira et al. (2011b) para solos bem manejados e são também menores do que os relatados por Zhong et al. (2015) para alfisol de textura barro-argilosa, no qual o valor médio chegou a cerca de 25% do COT. Essa diferença dos teores pode ter sido ocasionada devido a diferença de climas locais, espécies de plantas de cobertura utilizadas e tipo de solo da região em que os experimentos foram conduzidos.

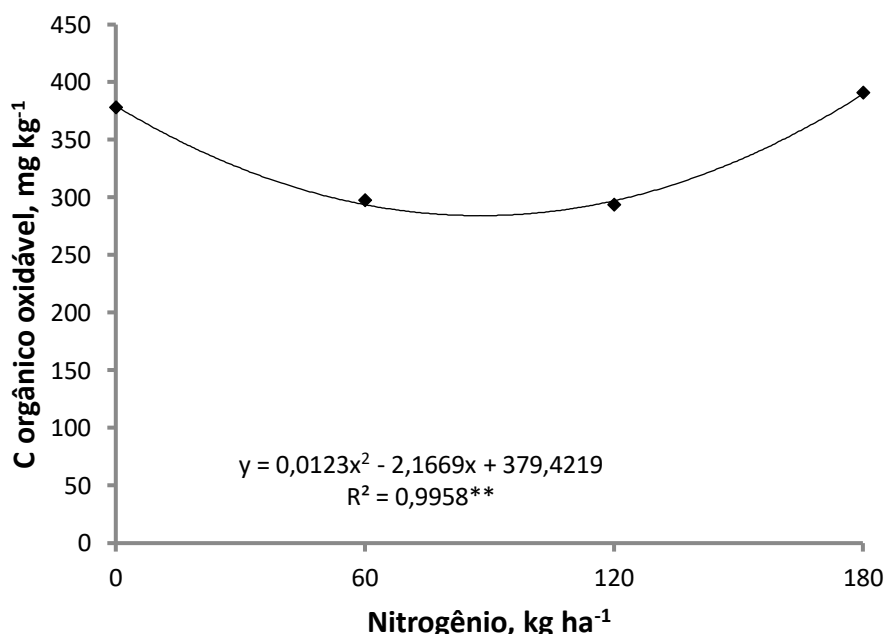


Figura 1. Carbono orgânico oxidável por permanganato de potássio em função das doses de nitrogênio.

As doses de N influenciaram os teores de COx, que diminuíram com as doses intermediárias (60 e 120 kg ha⁻¹), e aumentaram com a aplicação de 180 kg ha⁻¹, chegando a valores semelhantes aos obtidos no tratamento sem adubação nitrogenada (Figura 1). Zhong et al. (2015) também obtiveram aumento do COx, no caso com o uso de 90 kg ha⁻¹ de N, mas à medida que as doses de N aumentaram, o COx diminuiu. Segundo os autores, o aumento das doses de N causa supressão da atividade microbiana e existe correlação entre carbono da biomassa microbiana e COx. No presente caso, a data de coleta das amostras é muito posterior à última aplicação de N, de modo que o efeito de supressão da atividade microbiana pela adubação nitrogenada, se houve, já ocorreu.

Os tratamentos plantas de cobertura e doses de N apresentaram diferença estatística ($P < 0,05$) para índice de manejo do carbono (IMC) (Tabela 3). Porém, não houve interação entre ambas ($P > 0,05$). Os maiores valores de IMC foram obtidos com o milho e com o feijão-de-porco, e não diferiram da mucuna-cinza. O IMC permite avaliar conjuntamente os efeitos dos sistemas de manejo na quantidade e na qualidade (labilidade) da MOS (Conceição et al., 2014) e quanto maior o valor do IMC, maior é a qualidade do manejo (Leal et al., 2016; Reis et al., 2016). Deste modo, o uso de milho e feijão-de-porco na área de estudo vem resultando em ganho de qualidade em relação ao pousio. O cultivo de plantas de cobertura já foi indicado como fator de aumento do IMC em sistemas experimentais de cultivo à base de leguminosas e com adição de N mineral (Vieira, 2007), mas o milho também já foi apontado em pesquisas anteriores como a planta de cobertura mais eficiente para melhorar a qualidade do solo, influenciando diretamente em maiores teores de C nas frações húmicas da MOS, e consequentemente, em maior IMC (Souza et al., 2016b; Guimarães et al., 2018).

As doses de N intermediárias (60 e 120 kg ha⁻¹) causaram diminuição do IMC, seguidas de aumento com a aplicação de 180 kg ha⁻¹, chegando a valores semelhantes aos obtidos no tratamento sem adubação nitrogenada (Figura 2), ou seja, para o IMC foi observado o mesmo comportamento do COx (Figura 1).

Tabela 3. Índice de manejo de carbono, em função de plantas de cobertura e doses de nitrogênio, na profundidade de 0-10 cm.

N kg ha ⁻¹	Índice de Manejo do Carbono (IMC)				
	Pousio	Milheto	Mucuna-cinza	Feijão-de-porco	Média ¹
0	26,83	38,83	22,86	36,92	31,36
60	16,61	30,56	22,61	28,29	24,52
120	12,73	29,93	27,18	26,73	24,14
180	28,59	35,69	32,92	32,11	32,33
Média ¹	21,19b	33,75a	26,39ab	31,1a	
		Teste F	CV%		
Plantas de cobertura		13,75**	11,99		
Doses de N		6,09**	14,46		
PC X N		0,96 ^{NS}			

¹ Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. ** = significativo a 1% de probabilidade; ^{NS} = não significativo.

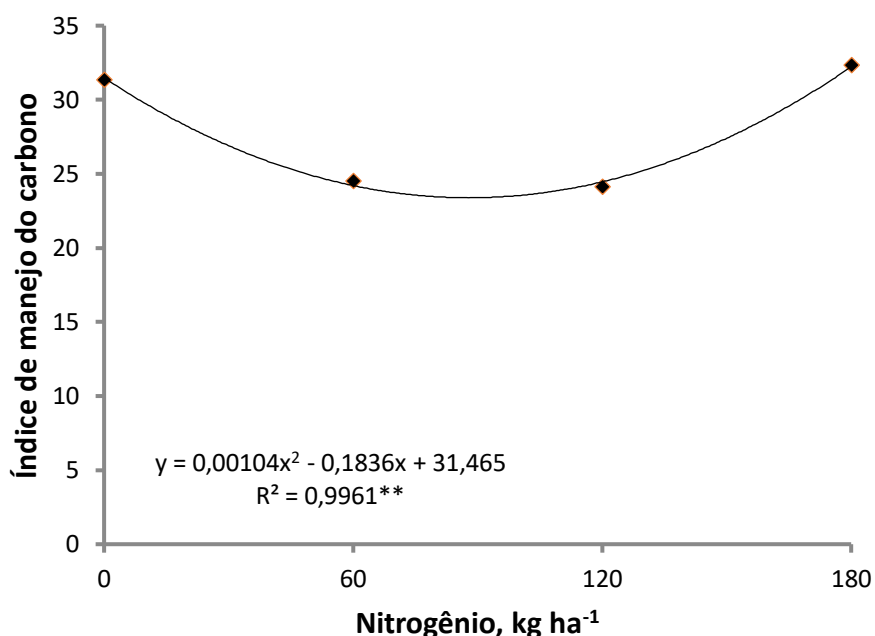


Figura 2. Índice de manejo do carbono em função das doses de nitrogênio.

Analisando as Figuras 1 e 2 percebe-se que o IMC teve o comportamento ditado pela labilidade do carbono, portanto, nas situações em que houver maior labilidade de C no solo, maior será a eficiência do manejo adotado. A aplicação de N mineral aumentou o IMC em 24% com a dose de 180 kg ha⁻¹. Dessa forma, a fertilização mineral só resultou em valores maiores de IMC com doses altas de N, possivelmente não apenas pela alteração na qualidade da matéria orgânica, mas

também devido às alterações na biomassa microbiana do solo (Viera et al., 2007; Mbuthia et al., 2015; Nivelles et al., 2016).

4.2 Nitrogênio total, mineralizável e mineral em função de plantas de cobertura

4.2.1 Nitrogênio total

Houve efeito significativo ($P < 0,05$) do cultivo de plantas de cobertura e da interação das plantas de cobertura e das doses de N (Tabela 4) no N total do solo e, com base na análise de regressão, observa-se aumento do N total apenas no tratamento pousio, até a dose de 99 kg ha^{-1} de N (Figura 3).

Tabela 4. Nitrogênio total do solo em função de plantas de cobertura e de doses de nitrogênio, na profundidade de 0-10 cm.

N kg ha^{-1}	N-total, g kg^{-1}				
	Pousio	Milheto	Mucuna-cinza	Feijão-de-porco	Média ¹
0	1,09b	1,17ab	1,40a	1,17ab	1,20
60	1,73a	1,11b	1,34b	1,23b	1,35
120	1,56a	1,34a	1,32a	0,82b	1,28
180	1,35a	1,23a	1,34a	1,23a	1,29
Média ¹	1,43	1,24	1,35	1,11	
		Teste F	CV%		
Plantas de cobertura		12,91**	12,20		
Doses de N		2,02 ^{NS}	13,12		
PC X N		5,69**			

¹ Médias com letras iguais na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

** = significativo a 1% de probabilidade; ^{NS} = não significativo.

No tratamento controle, sem adubação nitrogenada, o cultivo de mucuna-cinza resultou em maior teor de N total no solo. As demais espécies de cobertura, milho e feijão-de-porco, não diferiram da mucuna e do pousio na condição em que a adubação nitrogenada não vem sendo feita. Por outro lado, com a aplicação de 180 kg ha^{-1} de N o efeito do cultivo das plantas de cobertura no N total deixou de existir, obtendo-se valores semelhantes entre este tipo de manejo e o pousio (Tabela 4).

No estudo dos efeitos das doses de N dentro de cada espécie de cobertura obteve-se aumento de N total do solo com aplicação de até 116 kg ha^{-1} de N na condição de solo em pousio, com ajuste dos dados ao modelo quadrático (Figura 3). Nas condições de cultivo de milho, mucuna-cinza e feijão-de-porco não houve

ajuste dos dados de N total aos modelos linear e quadrático, conforme as doses de N aumentaram (Figura 3).

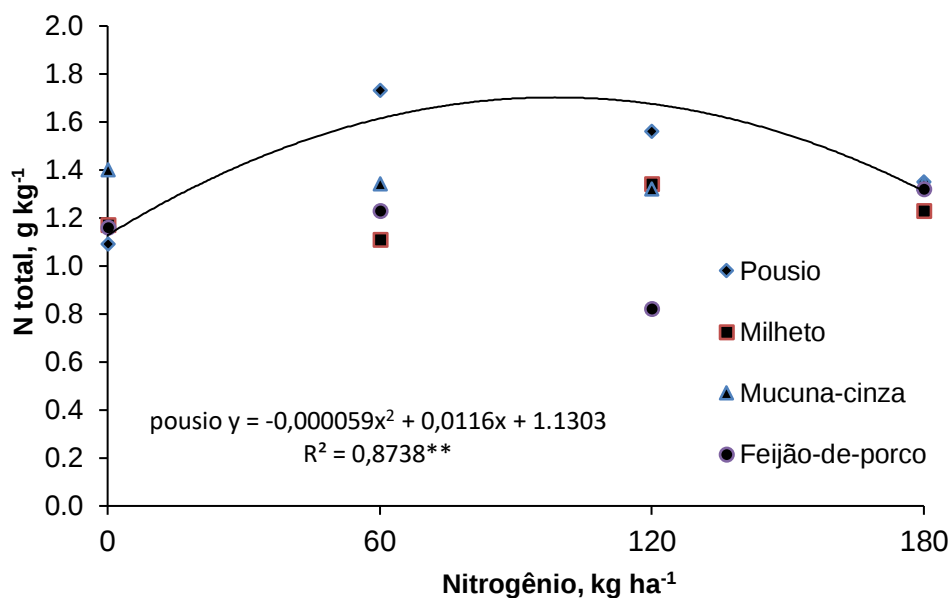


Figura 3. Nitrogênio total do solo em função de doses de N aplicadas em cobertura no milho para cada espécie de cobertura cultivada em pré-safra.

4.2.2 Nitrogênio orgânico mineralizável em função de plantas de cobertura e de doses de nitrogênio

a) N extraído com solução de permanganato de potássio

As plantas de cobertura e as doses de N apresentaram efeito significativo ($P < 0,05$) no nitrogênio extraído com solução de permanganato, mas não houve efeito de interação (Tabela 5). As plantas de cobertura se destacaram na definição do teor de N-KMnO₄ no solo e, dentre elas, a diferença entre feijão-de-porco e pousio foi de 7,5% na média das doses de N (Tabela 5).

Tabela 5. Nitrogênio orgânico mineralizável extraído com solução de permanganato de potássio, em função de plantas de cobertura e doses de nitrogênio, na profundidade de 0-10 cm.

N kg ha ⁻¹	N- KMnO ₄ , mg kg ⁻¹				
	Pousio	Milheto	Mucuna-cinza	Feijão-de-porco	Média ¹
0	145,46	150,05	141,41	159,39	142,80
60	147,45	145,48	164,01	155,05	153,00
120	145,11	157,48	167,71	166,49	159,20
180	146,62	154,05	169,30	176,57	161,63
Média ¹	146,16b	151,77ab	160,61ab	164,37a	
	Teste F		CV%		
Plantas de cobertura		3,68*	2,14		
Doses de N		3,66*	1,52		
PC X N		1,34 ^{NS}			

¹ Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. ** = significativo a 1% de probabilidade; ^{NS} = não significativo.

Os cultivos de cobertura podem ter aumentado a concentração de compostos orgânicos nitrogenados de baixo peso molecular por meio da exsudação radicular, o que pode explicar o conteúdo significativamente maior de N mineralizável no solo nestes tratamentos em relação ao pousio. Em estudos anteriores foi demonstrado que as plantas de cobertura apresentam maior aumento na disponibilidade de nitrogênio do solo do que sistemas convencionais (Veras et al., 2016; Zhou et al., 2016).

As frações lábeis de N no solo podem chegar a representar um reservatório maior do que o de nitrogênio mineral, representando boa parte do N-total quando os sistemas são bem manejados (Thomas et al., 2015). No entanto, apesar dessas frações lábeis chegarem a representar mais da metade do N-total, apenas uma pequena parte deste N pode ser potencialmente mineralizável ou convertido a nitrogênio mineral (Belay-Tedla et al., 2009).

Deste modo, como observado no presente estudo, o cultivo de plantas de cobertura é uma forma eficiente para aumentar a quantidade de nitrogênio no solo que pode ser absorvido pelas plantas, mesmo se a espécie cultivada for uma gramínea, como o milheto, diminuindo assim as perdas, já que a mineralização desse conjunto de formas orgânicas simples ocorre de modo gradual. É importante mencionar que esse processo depende do tempo em que o cultivo de plantas de cobertura é realizado para que a mineralização possa ocorrer gradualmente. Além disso, as leguminosas apresentam relação C/N menor em comparação às

gramíneas, com decomposição mais rápida, liberando assim mais nitrogênio prontamente disponível no solo.

Em estudo realizado por Beltrán et al. (2018) também foi observado aumento de N mineralizável devido ao uso de plantas de cobertura. Como ocorreu no presente estudo, não houve diferenças entre as plantas de cobertura fertilizadas ou não fertilizadas com N. Em outro estudo de longo prazo (mais de uma década), também foram obtidos ganhos de N mineralizável em tratamentos com plantas de cobertura em relação a plantios convencionais (Snapp et al., 2017).

Com o aumento das doses de N houve aumento linear do N mineralizável extraído com solução de KMnO_4 (Figura 4). O aumento observado com aplicação de 180 kg ha^{-1} de N foi de 12% em relação ao controle, sem adubação nitrogenada (Figura 3). Assim, com o aumento das doses de N que foram aplicadas durante todos os anos do experimento, está havendo aumento de N em formas orgânicas mais facilmente mineralizáveis.

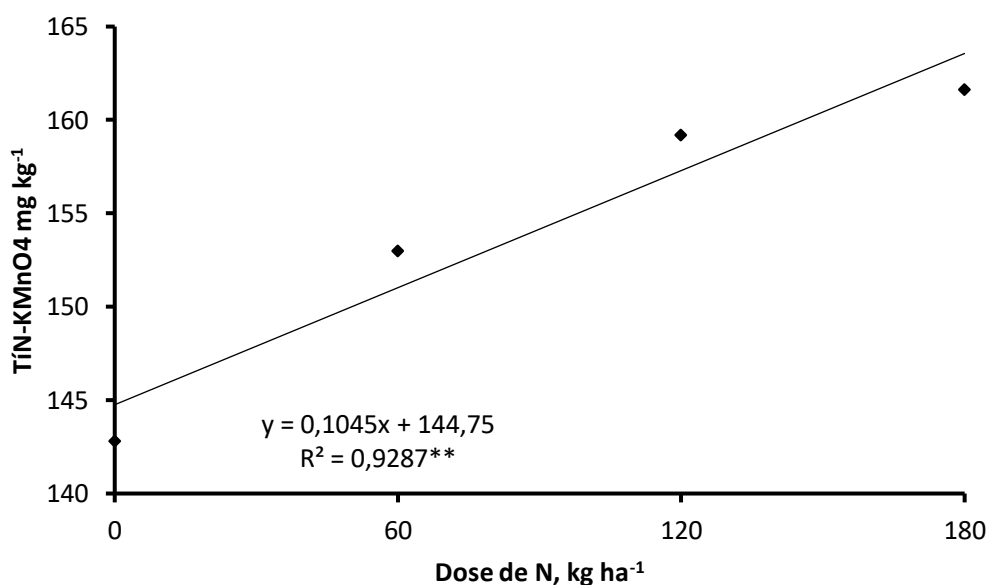


Figura 4. Nitrogênio orgânico mineralizável extraído com solução de permanganato de potássio em função de plantas de cobertura e doses de nitrogênio.

b) Nitrogênio orgânico mineralizável obtido por hidrólise alcalina (N-DVD)

Houve efeitos isolados e de interação de cultivo de plantas de cobertura e de doses de N no N-DVD (Tabela 6).

Tabela 6. Nitrogênio orgânico mineralizável extraído por hidrólise alcalina, em função de plantas de cobertura e doses de nitrogênio, na profundidade de 0-10 cm.

N kg ha ⁻¹	N-DVD, mg kg ⁻¹				
	Pousio	Milheto	Mucuna-cinza	Feijão-de-porco	Média ¹
0	64,20c	102,41a	91,48b	119,95a	94,51
60	74,72b	92,75a	95,45a	118,53a	95,36
120	63,35b	108,45a	114,21a	120,03a	101,51
180	92,40b	89,21b	125,57a	131,25a	109,61
Média ¹	73,67	98,21	106,68	122,44	
	Teste F		CV%		
Plantas de cobertura	32,20**		14,32		
Doses de N	4,33*		13,37		
PC X DN	2,65*				

¹ Médias com letras iguais na linha (plantas de cobertura) não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. ** = significativo a 1% de probabilidade; ^{NS} = não significativo.

Os menores teores de N-DVD ocorreram no pousio (Tabela 6), independentemente da dose de N aplicada (Tabela 5). Nos tratamentos em que foram cultivadas espécies de cobertura, gramínea ou leguminosa, os teores de N-DVD aumentaram. Resultado semelhante foi relatado por Mwakimbwala (2015), que descreveu aumento no N disponível do solo após o corte das plantas de cobertura, principalmente no tratamento com a cultura do feijão-de-porco. Outros estudos também mostraram maior disponibilidade de N devido ao plantio de feijão-de-porco em longo prazo na sucessão da cultura do arroz (Reis et al., 2017), do maracujá (Dantas et al., 2019) e do café (Araújo et al., 2014) em relação a métodos convencionais de preparo do solo.

O cultivo de plantas de cobertura aumenta o teor de N potencialmente mineralizável rapidamente no solo. Esses sistemas geralmente tem entrada de ampla variedade de compostos orgânicos, que favorecem um conjunto diversificado de organismos decompositores, o que contribui para uma maior atividade da microbiota do solo (Norton et al., 2012). Além disso, algumas leguminosas, como o feijão-de-porco, produzem restos culturais com baixa relação C/N, que mineralizam rapidamente (Bettiol, 2018).

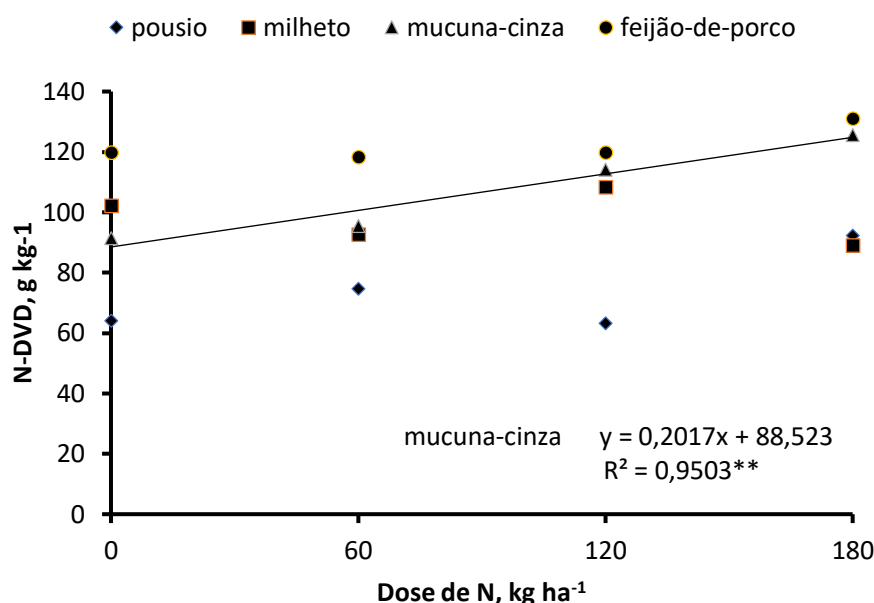


Figura 5. Nitrogênio mineralizável extraído por hidrólise alcalina (N-DVD) em função de doses de N aplicadas em cobertura no milho para cada espécie de cobertura cultivada em pré-safra.

O conteúdo de N-DVD aumentou linearmente no tratamento mucuna-cinza com o aumento da adubação nitrogenada (Figura 5). Em estudo anterior foi observado que a adição de adubos inorgânicos aumentou o N potencialmente mineralizável em até 19% (Mahal et al., 2018). No mesmo estudo foi constatado que a rotação de culturas por mais de 15 anos apresenta efeito de aumento de 25% na disponibilização de N, quando comparada com lavouras sem rotação.

4.2.4 Nitrogênio mineral

O N-mineral não variou em função dos tratamentos ($P > 0,05$) entre plantas de cobertura e as doses de nitrogênio, e também não houve interação significativa ($P > 0,05$) entre as doses de N e as plantas de cobertura (Tabela 7).

Apesar de o nitrogênio mineral não ter apresentado significância entre os tratamentos avaliados, as demais frações de carbono e nitrogênio avaliadas nesse trabalho podem ser preditoras de N mineral no solo. Possivelmente, o N mineral no solo não aumentou ou apresentou efeitos significativos porque os aumentos de COT e nitrogênio orgânico mineralizável foram pequenos.

Tabela 7. Nitrogênio mineral, em função de plantas de cobertura e doses de nitrogênio, na profundidade de 0-10 cm.

N kg ha ⁻¹	N-mineral, mg kg ⁻¹				
	Pousio	Milheto	Mucuna	Feijão-de-porco	Média ¹
0	9,99	10,47	10,99	10,87	10,58a
60	11,65	11,72	12,36	8,15	10,97a
120	10,73	9,67	10,43	14,86	11,42a
180	8,01	11,00	17,37	13,21	12,39a
Média ¹	10,09a	10,72a	12,79a	11,77a	
	Teste F		CV%		
Plantas de cobertura	2,49 ^{NS}		26,49		
Doses de N	0,77 ^{NS}		31,47		
PC X DN	2,01 ^{NS}				

¹ Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. ** = significativo a 1% de probabilidade; ^{NS} = não significativo.

Em outras pesquisas já foi demonstrado o potencial das plantas de cobertura em aumentar o N-mineral do solo quando as espécies cultivadas foram o feijão-de-porco (Spagnollo et al., 2002; Collier et al., 2011; Reis et al., 2017) e a mucuna (Spagnollo et al., 2002; Reis et al., 2017).

4.3 Correlações entre N absorvido pelo milho e formas de C e N do solo

O nitrogênio mineral (Tabela 7) é uma fração de nitrogênio que não variou com o efeito das doses de N e plantas de cobertura no solo. Portanto, uma forma de avaliar o nitrogênio que pode ser absorvido do solo é através de métodos que se correlacionam melhor, ou até mesmo, se aproximam do nitrogênio disponível no solo. O nitrogênio absorvido correlacionou positivamente com o COT (0,3415**), o N-DVD (0,3096*) e o N-KMnO₄ (0,2767*) (Tabela 8). Como se observa, em todas as situações, apesar da significância, a variável do solo explica muito pouco da variação no N absorvido pelo milho.

Não houve correlação entre as variáveis COx (0,0567^{NS}), N-total (0,0543^{NS}) e N-mineral (0,1122^{NS}) com o nitrogênio absorvido (Tabela 8), o que indica que essas frações não refletem o nitrogênio absorvido pela cultura do milho em sucessão a plantas de cobertura.

O nitrogênio mineral correlacionou positivamente apenas com o nitrogênio potencialmente mineralizável (0,2998*), mas também neste caso o valor de r é muito baixo.

Tabela 8. Correlação de Pearson (r) do nitrogênio absorvido pela cultura do milho em relação aos atributos estudados.

	N absor (kg ha ⁻¹)	COT	COx	N-Mineral	N-DVD	NT
COT	0,3415**					
COx	0,0567 ^{NS}	0,4198**				
N-Mineral	0,1122 ^{NS}	0,2493*	0,1375 ^{NS}			
N-DVD	0,3096*	0,6044**	0,3732**	0,2249 ^{NS}		
N-total	0,0543 ^{NS}	-0,1601 ^{NS}	-0,1868 ^{NS}	-0,1032 ^{NS}	-0,2502*	
N-KMnO ₄	0,2767*	0,2673*	0,0891 ^{NS}	0,2998*	0,3669**	-0,0631 ^{NS}
Teste t						
	5%	1,99				
	1%	2,66				

** = significativo a 1% de probabilidade; * = significativo a 5% de probabilidade; ^{NS} = não significativo.

Deste modo, nenhuma das variáveis avaliadas pode ser indicada como um índice eficiente de previsão da disponibilidade de N em sistemas de cultivo que combinam gramíneas e leguminosas de cobertura em pré-safra de milho.

No presente trabalho, o ganho de qualidade do solo foi particularmente evidenciado pelo aumento no COT, COx, IMC, N-lábil e N-KMnO₄.

5. CONCLUSÕES

- Independentemente da espécie de planta de cobertura utilizada, milheto, mucuna-cinza ou feijão-de-porco, houve aumento no carbono orgânico total e no C lábil obtido por extração com solução de permanganato de potássio.
- Houve aumento no índice de manejo do carbono com o cultivo das plantas de cobertura (milheto, mucuna-cinza e feijão-de-porco), o que indica ganho de qualidade do solo.
- A adubação nitrogenada em cobertura no milho cultivado após as plantas de cobertura não beneficia o acúmulo de N total, mas tende a aumentar as formas orgânicas mineralizáveis.

6. REFERÊNCIAS

Acosta JDA, Amado TJC, Silva LS, Santi A, Weber MA (2014) Decomposição da fitomassa de plantas de cobertura e liberação de nitrogênio em função da quantidade de resíduos aportada ao solo sob sistema plantio direto. **Ciência Rural** 44(5): 801-809.

Aita C, Giacomini SJ (2003) Decomposição e liberação de nitrogênio de resíduos culturais de plantas de cobertura de solo solteiras e consorciadas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 27(4): 601-612.

Albuquerque JA, Argenton J, Bayer C, Wildner LDP, Kuntze MAG (2005) Relationship of soil attributes with aggregate stability of a hapludox under distinct tillage systems and summer cover crops. **Revista Brasileira de Ciência do solo** 29(3): 415-424.

Alegari A, Alcântara PB, Miyasaka S, Amado TJC. (1992) Caracterização das principais espécies de adubo verde. In: Costa MBB, coord. Adubação verde no Sul do Brasil. 2.ed. Rio de Janeiro, AS-PTA, p.207-327.

Alvarenga RC, Cabezas WAL, Cruz JC, Santana DP (2001) Plantas de cobertura de solo para sistema plantio direto. **Informe Agropecuário** 22(208): 25-36.

Alvares CA, Stape JL, Sentelhas PC, Moraes G, Leonardo J, Sparovek G (2013) Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift* 22:711-728.

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, DF: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1999. CD-ROM.

Araújo JBS, Rodrigues LB, Rodrigues MC, Martinez HEP, Santos RHS (2014) Nitrogen fertilization of coffee tree with jack-bean biomass. **Coffee Science** 9(3): 336-346.

Belay-Tedla A, Zhou X, Su B, Wan S, Luo Y (2009) Labile, recalcitrant, and microbial carbon and nitrogen pools of a tallgrass prairie soil in the US Great Plains subjected to experimental warming and clipping. **Soil Biology and Biochemistry** 41(1): 110-116.

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

Beltrán MJ, Sainz-Rozas H, Galantini JA, Romaniuk RI, Barbieri P (2018) Cover crops in the Southeastern region of Buenos Aires, Argentina: effects on organic matter physical fractions and nutrient availability. **Environmental earth sciences** 77(12): 428.

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.

Blanco-Canqui H, Shaver TM, Lindquist JL, Shapiro CA, Elmore RW, Francis CA, Hergert GW (2015) Cover crops and ecosystem services: Insights from studies in temperate soils. **Agronomy Journal** 107(6): 2449-2474.

Bongiorno G, Bünemann EK, Oguejiofora CU, Meierb J, Gortc G, Comansd R, Mäderb P, Brussaarda L, Goede R de (2019) Sensitivity of labile carbon fractions to tillage and organic matter management and their potential as comprehensive soil quality indicators across pedoclimatic conditions in Europe. **Ecological Indicators** 99: 38–50. doi:10.1016/j.ecolind.2018.12.008.

Brandan CP, Chavarrã D, Huidobro J, Meriles J, Brandan CP, Gil SV. (2017) Influence of a tropical grass (*Brachiaria brizantha* cv. Mulato) as cover crop on microbial abundance and function in a degraded agricultural soil. **European journal of soil biology** 83: 84-90.

Bushong JT, Roberts TL, Ross WJ, Norman RJ, Slaton NA, Wilson CE (2008) Evaluation of distillation and diffusion techniques for estimating hydrolyzable amino sugar-nitrogen as a means of predicting nitrogen mineralization. **Soil Science Society of America Journal** 72: 992-999.

Bünemann EK, Bongiorno G, Bai Z, Creamer RE, DeDeyn G, Goede R, Flesskens L, Geissen V, Kuiper TW, Mäder P, Pulleman M, Sukkel W, Van Groenigen JW, Brussaard L (2018) Soil quality – A critical review. **Soil Biology and Biochemistry**, 120: 105–125.

Caetano JO, Benites VM, Silva GP, Silva IR da, Assis RL de, Cargnelutti Filho A (2013) Dinâmica da matéria orgânica de um neossolo quartzarênico de cerrado convertido para cultivo em sucessão de soja e milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 37(5): 1245-1255.

Cameron KC, Di HJ, Moir JL (2013) Nitrogen losses from the soil/plant system: a review. **Annals of Applied Biology** 162(2): 145-173.

Cantarella H, Trivelin PCO (2001) Determinação de nitrogênio total em solo. In: RAIJ, B. van; Andrade, J.C.; Cantarella, H.; Quaggio, J.A. (eds.) **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, p.263-269.

Carvalho AMD, Marchão RL, Souza KW, Bustamante MMDC (2014) Soil fertility status, carbon and nitrogen stocks under cover crops and tillage regimes. **Revista Ciência Agrônoma** 45: 914-921.

Coelho AM, França GE (Eds.) (1995) Seja o doutor do seu milho: nutrição e adubação. 2 ed. Piracicaba: Informações Agrônomicas, 33p.

Collier LS, Kikuchi FY, Benício LPF, Souza SA (2011) Consórcio e sucessão de milho e feijão-de-porco como alternativa de cultivo sob plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Tropical** 41(3): 10-16.

Conceição PC, Bayer C, Diekow J, Santos DCD (2014) Fracionamento físico da matéria orgânica e índice de manejo de carbono de um Argissolo submetido a sistemas conservacionistas de manejo. **Ciência Rural**, 44(5): 794-800.

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

Dantas EF, Freitas ADS de, Lyra MDCCP de, Santos CERS, Carvalho Neta SJ, Santana ACA, Bezerra RV, Sampaio EVSB (2019) Biological fixation, transfer and balance of nitrogen in passion fruit (*'Passiflora edulis'* Sims) orchard intercropped with different green manure crops. **Australian Journal of Crop Science** 13(3): 465.

Duval ME, Galantini JA, Capurro JE, Martinez JM (2016) Winter cover crops in soybean monoculture: Effects on soil organic carbon and its fractions. **Soil and Tillage Research** 161: 95-105.

Faria CMB, Soares JM, Leão PCS (2004) Green manuring grapevine with legumes in the submiddle São Francisco River Valley. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 28(4): 641-648.

Gabriel JL, Muñoz-Carpena R, Quemada M (2012) The role of cover crops in irrigated systems: Water balance, nitrate leaching and soil mineral nitrogen accumulation. **Agriculture, ecosystems & environment** 155: 50-61.

Gabriel JL, Alonso-Ayuso M, García-González I, Hontoria C, Quemada M (2016) Nitrogen use efficiency and fertiliser fate in a long-term experiment with winter cover crops. **European journal of agronomy** 79: 14-22.

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(2): 325-334.

Ghosh BN, Meena VS, Alam NM, Dogra P, Bhattacharyya R, Sharma NK, Mishra PK (2016) Impact of conservation practices on soil aggregation and the carbon management index after seven years of maize–wheat cropping system in the Indian. **Agriculture, Ecosystems & Environment** 216: 247-257.

Guimarães DV, Silva MLN, Beiniach A, Bispo DFA, Contins JGP, Curi N (2018) Relationship between soil organic matter fractions and cover plants in Olive post planting. **Revista Brasileira de Fruticultura** 40(6): 1-12.

Guzmán G, Cabezas JM, Sánchez-Cuesta R, Lora Á, Bauer T, Strauss P, Winter S, Zaller JG, Gómez JA (2019). A field evaluation of the impact of temporary cover crops on soil properties and vegetation communities in southern Spain vineyards. **Agriculture, ecosystems & environment** 272: 135-145.

Gonçalves CN, Ceretta CA (1999) Plantas de cobertura de solo antecedendo o milho e seu efeito sobre o carbono orgânico do solo, sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 23(2): 307-313.

Himalayas. **Agriculture, Ecosystems & Environment** 216: 247-257. doi.org/10.1016/j.agee.2015.09.038.

Hurisso TT, Culman SW, et al. (2016) Comparison of permanganate-oxidizable carbon and mineralizable carbon for assessment of organic matter stabilization and mineralization. **Soil Science Society of America Journal** 80:1352-1364.

Ladoni M, Basir A, Kravchenko A. (2015) Which soil carbon fraction is the best for assessing management differences? A statistical power perspective. **Soil Science Society American Journal** 79: 848.

Lal R (2011) Sequestering carbon in soils of agro-ecosystems. **Food Policy** 36(1): 33–39.

Leal ODA, Castilhos RMV, Pinto LFS, Pauletto EA, Lemes ES, Kunde RJ (2016) Initial recovery of organic matter of a grass-covered constructed soil after coal mining. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 40 (1): 1-16.

Lewis KL, DeLaune P, Keeling W (2017) Securing our soil in intensive monoculture cropping systems. **Global Soil Security** 145-151.

Lima E, Crusciol CAC, Leitão-Lima P, Corrêa J (2005) Espécies para cobertura e qualidade dos resíduos vegetais na implantação do sistema de plantio direto em região de inverno seco. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo** 4(2): 180-194.

Ludwig M, Meyhöfer R (2016) Efficacy of crop cover netting against cabbage pests and their natural enemies and relevance of oilseed rape. **Journal of Plant Diseases and Protection** 123(6): 331-338.

Luo Z, Feng W, Luo Y, Baldock J, Wang E (2017) Soil organic carbon dynamics jointly controlled by climate, carbon inputs, soil properties and soil carbon fractions. **Global Change Biology** 23(10): 4430-4439.

Maia FEN, Miranda NO, Melo IGC, Viana MGP, Góis SRP (2013) Biomassa de feijão de porco sob diferentes densidades de semeadura em Mossoró, RN. **Agropecuária Científica no Semiárido** 9: 43-49.

Mahal NK, Castellano MJ, Miguez FE (2018) Conservation agriculture practices increase potentially mineralizable nitrogen: A meta-analysis. **Soil Science Society of America Journal** 82(5): 1270-1278.

Meurer EJ (2012) Fundamentos de química do solo. 5 ed. Porto Alegre: Evangraf, 280p.

Mwakimbwala RR (2015) **Comparative improvement in soil nitrogen by five leguminous cover crops at Uyole agricultural research institute, Mbeya, Tanzania**. 114 f. Dissertation (Master in crop science) – Sokoine University of Agriculture, Morogoro/Tanzania.

Margenot AJ, Pulleman MM, Sommer R, Paul BK, Parikh SJ, Jackson LE, Fonte SJ. (2017) Biochemical proxies indicate differences in soil C cycling induced by longterm tillage and residue management in a tropical agroecosystem. **Plant Soil** 420: 315–329.

Mbuthia LW, Acosta-Martínez V, DeBruyn J, Schaeffer S, Tyler D, Odoi E, Mpheshea M, Walker F, Eash N (2015) Long term tillage, cover crop, and fertilization effects on microbial community structure, activity: Implications for soil quality. **Soil Biology and Biochemistry** 89: 24-34.

Muraishi CT, Leal AJF, Lazarini E, Rodrigues LR, Gomes Junior FG (2005) Manejo de espécies vegetais de cobertura de solo e produtividade do milho e da soja em semeadura direta. **Acta Scientiarum. Agronomy** 27(2): 199-206.

Nivelle E, Verzeaux J, Habbib H, Kuzyakov Y, Decocq G, Roger D, Lacoux J, Duclercq J, Spicher F, Nava-Saucedo J, Catterou M, Dubois F, Tetua T (2016) Functional response of soil microbial communities to tillage, cover crops and nitrogen fertilization. **Applied soil ecology** 108: 147-155.

Norton JB, Mukhwana EJ, Norton U (2012) Loss and recovery of soil organic carbon and nitrogen in a semiarid agroecosystem. **Soil Science Society of America Journal** 76(2): 505-514.

Ohland RAA, Souza LD, Hernani LC, Marchetti ME, Gonçalves MC (2005) Culturas de cobertura do solo e adubação nitrogenada no milho em plantio direto. **Ciência e Agrotecnologia** 29(3): 538-544.

Okito A, Alves BJR, Urquiaga S, Boddey RM. (2004) Nitrogen fixation by groundnut and velvet bean residual benefit to a subsequent maize crop. **Pesq. Agropec. Brasileira** 39:1183-1190.

Oliveira FÉRD, Oliveira JDM, Xavier FADS (2016) Changes in soil organic carbon fractions in response to cover crops in an orange orchard. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 40: 1-12.

Palm CA, Giller KE, Mafongoya PL, Swift MJ (2001) Management of organic matter in the tropics: translating theory into practice. **Nutrient Cycling in Agroecosystems** 61: 63–75.

Poeplau C, Don A (2015) Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops—A meta-analysis. **Agriculture, Ecosystems & Environment** 200: 33-41.

Radicetti E, Mancinelli R, Moscetti R, Campiglia E (2016) Management of winter cover crop residues under different tillage conditions affects nitrogen utilization efficiency and yield of eggplant (*Solanum melanogena* L.) in Mediterranean environment. **Soil and Tillage Research** 155: 329-338.

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

Reis AFB, Almeida REM, Chagas Junior AFC, Nascente AS (2017) Plantas de cobertura afetando atributos de solo, nutrição e produtividade do arroz irrigado tropical. **Revista Caatinga** 30(4): 837-846.

Reis DA, Lima CLR, Bamberg AL (2016) Qualidade física e frações da matéria orgânica de um Planossolo sob sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 51(9): 1623-1632.

Rovira P, Jorba M, Romanyà J (2010) Active and passive organic matter fractions in Mediterranean forest soils. **Biology and Fertility of Soils** 46(4): 355-369.

Sá JCM, Gonçalves DRP, Ferreira LA, Mishra U, Inagaki TM, Furlan FJF, Moro RS, Floriani N, Briedis C, Ferreira AO (2018) Soil carbon fractions and biological activity based indices can be used to study the impact of land management and ecological successions. **Ecological Indicators** 84: 96-105. doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.08.029.

Salmerón M, Caverro J, Quílez D, Isla R (2010) Winter cover crops affect monoculture maize yield and nitrogen leaching under irrigated Mediterranean conditions. **Agronomy journal** 102(6): 1700-1709.

Santos NCB dos, Tarsitano MAA, Arf O, Mateus GP (2010) Análise econômica do consórcio feijoeiro e milho-verde. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo** 8(01): 1-12.

Sequeira CH, Alley MM (2011a) Soil organic matter fractions as indices of soil quality changes. **Soil Science Society American Journal** 75: 1766–1773.

Sequeira CH, Alley MM, Jones BP (2011b) Evaluation of potentially labile soil organic carbon and nitrogen fractionation procedures. **Soil Biology and Biochemistry** 43(2): 438-444.

Silva PCG, Foloni JSS, Fabris LB, Tirirtan CS (2009) Fitomassa e relação C/N em consórcios de sorgo e milho com espécies de cobertura. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 44(11): 1504-1512.

Shang C, Tiessen H (1997) Organic matter lability in a tropical oxisol: evidence from shifting cultivation, chemical oxidation, particle size, density and magnetic fractionations. **Soil Science** 162 (11): 795-807.

Sharifi M, Zebarth BJ, Burton DL, Rodd V, Grant CA (2011) Long-term effects of semisolid beef manure application to forage grass on soil mineralizable nitrogen. **Soil Science Society of America Journal** 75(2): 649-658.

Snapp S, Wilke B, Gentry LE, Zoellner D (2017) Compost legacy down-regulates biological nitrogen fixation in a long-term field experiment. **Agronomy Journal** 109(6): 2662-2669.

Souza WJO, Melo WJ (2000) Teores de nitrogênio no solo e nas frações da matéria orgânica sob diferentes sistemas de produção de milho. **Revista Brasileira de Ciência do solo** 24(4): 885-896.

Souza GPD, Figueiredo CCD, Sousa DMGD (2016) Soil organic matter as affected by management systems, phosphate fertilization, and cover crops. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 51(9): 1668-1676.

Spagnollo E, Bayer C, Wildner LDP, Ernani PR, Albuquerque JA, Proença MM (2002) Leguminosas estivais intercalares como fonte de nitrogênio para o milho, no Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 26(2): 417-423.

Tedesco MJ, Gianello C, Bissani CA, Bohnen H, Volkweiss SJ (1995) Análise de solo, plantas e outros materiais. 2. ed. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 147p.

Teixeira CM, Carvalho GJ de, Silva CA, Andrade MJB; Pereira JM. (2010) Liberação de macronutrientes das palhadas de milheto solteiro e consorciado com feijão-deporco sob cultivo de feijão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 2: 497-505

Teixeira EI, Johnstone P, Chakwizira E, Ruiter J, Malcolm B, Shaw N, ... Fraser P (2016) Sources of variability in the effectiveness of winter cover crops for mitigating N leaching. **Agriculture, Ecosystems & Environment** 220: 226-235.

Thilakarathna MS, Serran S, Lauzon J, Janovicek K, Deen B (2015) Management of manure nitrogen using cover crops. **Agronomy Journal** 107(4): 1595-1607.

Teodoro RB et al. (2011) Aspectos agronômicos de leguminosas para adubação verde no Cerrado do Alto Vale do Jequitinhonha. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 35: 635-640. doi: 10.1590/S0100- 06832011000200032.

Thomas BW, Whalen JK, Sharifi M, Chantigny M, Zebarth BJ (2015) Labile organic matter fractions as early-season nitrogen supply indicators in manure-amended soils. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science** 179(1): 94-103.

Veras MDS, Ramos MLG, Oliveira DNS, Figueiredo CCD, Carvalho AMD, Pulrolnik K, Souza KWD (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.

Verzeaux J, Alahmad A, Habbib H, Nivelles E, Roger D, Lacoux J, Decocq G, Hirel B, Catterou M, Spicher F, Dubois F, Duclercq J, Tetu T (2016) Cover crops prevent the deleterious effect of nitrogen fertilisation on bacterial diversity by maintaining the carbon content of ploughed soil. **Geoderma** 281: 49-57.

Vieira FCB, Bayer C, Zanatta JA, Dieckow J, Mielniczuk J, He ZL (2007) Carbon management index based on physical fractionation of soil organic matter in an Acrisol under long-term no-till cropping systems. **Soil and Tillage Research** 96(1-2): 195-204.

Walkley A, Black IA (1934) An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic soil titration method. *Soil Science*. 37: -38.

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

Weil RR, Magdoff F (2004) Significance of soil organic matter to soil quality and health. In: Magdoff, F., Weil, R.R. (Eds.) **Soil Organic Matter in Sustainable Agriculture**. CRC Press, p. 1–43.

Zhang H, Zhang Y, Yan C, Liu E, Chen B (2016) Soil nitrogen and its fractions between long-term conventional and no-tillage systems with straw retention in dryland farming in northern China. **Geoderma** 269: 138-144

Zhou X, Wu H, Li G, Chen C (2016) Short-term contributions of cover crop surface residue return to soil carbon and nitrogen contents in temperate Australia. **Environmental Science and Pollution Research** 23(22): 23175-23183.