

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

**EFEITOS DE ESTERCO BOVINO EM ATRIBUTOS  
QUÍMICOS E FÍSICOS DO SOLO, PRODUTIVIDADE DE  
MILHO E CRÉDITOS DE NITROGÊNIO**

**Marcio Silveira da Silva**

Engenheiro Agrônomo

2018

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

**EFEITOS DE ESTERCO BOVINO EM ATRIBUTOS  
QUÍMICOS E FÍSICOS DO SOLO, PRODUTIVIDADE DE  
MILHO E CRÉDITOS DE NITROGÊNIO**

**Marcio Silveira da Silva**

**Orientadora: Profa. Dra. Mara Cristina Pessôa da Cruz  
Coorientador: Prof. Dr. Edson Luiz Mendes Coutinho**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias - Unesp, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Doutor em Agronomia (Ciência do Solo).

**2018**

Silva, Marcio Silveira  
S586e Efeitos de esterco bovino em atributos químicos e físicos do solo, produtividade de milho e créditos de nitrogênio / Marcio Silveira da Silva. -- Jaboticabal, 2018  
xi, 77 p. : il. ; 29 cm

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2018

Orientadora: Mara Cristina Pessoa da Cruz

Banca examinadora: Felipe Batistella Filho, Itamar Andrioli, José Ricardo Mantovani, Manoel Evaristo Ferreira

Bibliografia

1. Adubação nitrogenada. 2. Adubo orgânico. 3. Carbono orgânico do solo. 4. Valor de substituição do nitrogênio. 5. *Zea mays* (L.). I. Título. II. Jaboticabal-Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias.

CDU 631.41:633.15

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação – Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação - UNESP, Câmpus de Jaboticabal.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal



**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

TÍTULO DA TESE: EFEITOS DE ESTERCO BOVINO EM ATRIBUTOS QUÍMICOS E FÍSICOS DO SOLO, PRODUTIVIDADE DE MILHO E CRÉDITOS DE NITROGÊNIO

**AUTOR: MARCIO SILVEIRA DA SILVA**

**ORIENTADORA: MARA CRISTINA PESSOA DA CRUZ**

**COORIENTADOR: EDSON LUIZ MENDES COUTINHO**

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor 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. FELIPE BATISTELLA FILHO  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo / Campus Matão/SP

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

Prof. Dr. ITAMAR ANDRIOLI  
Departamento de Solos e Adubos / FCAV / UNESP - Jaboticabal

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

Jaboticabal, 28 de maio de 2018

## **DADOS CURRICULARES DO AUTOR**

Marcio Silveira da Silva, nascido em 25 de abril de 1985, em São Paulo – SP, é Engenheiro Agrônomo, formado em janeiro de 2010 pela Faculdade de Engenharia – UNESP (Câmpus de Ilha Solteira). Trabalhou, neste período, com adubação nitrogenada na cultura do algodoeiro e manejo da palhada em sistema plantio direto, sendo bolsista de iniciação científica do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq - PIBIC) de 2006 a 2009. Em julho de 2012 começou a trabalhar como engenheiro agrônomo na Prefeitura Municipal de Ribeirão Preto. Em novembro de 2013 obteve título de mestre em Agronomia pelo Programa de Pós-graduação em Agronomia (Produção Vegetal) da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias - UNESP (Câmpus de Jaboticabal). Durante o mestrado foi bolsista da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) de agosto de 2011 a junho de 2012. Em março de 2014 iniciou o curso de doutorado em Agronomia pelo Programa de Pós-graduação em Agronomia (Ciência do Solo) na mesma instituição.

## **OFEREÇO**

À Jéssica Scavazini Resende, por toda ajuda, apoio e amor durante esta etapa!

## **DEDICO**

Aos meus pais Maria Socorro Bezerra da Silva e Josemar Silveira da Silva, pela especial atenção dada a mim e por todo apoio, carinho, amor e dedicação dispensados para que eu completasse esta etapa.

A vocês dedico este momento único e especial de realização!!

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por me propiciar este momento especial!

À Prof. Dra. Mara Cristina Pessôa da Cruz pela paciência, disposição e principalmente pelos valiosos ensinamentos!!

Ao coorientador Prof. Dr. Edson Luiz Mendes Coutinho, pelos ensinamentos, dedicação e paciência com os quais conduziu grande parte deste trabalho.

À UNESP- Câmpus de Jaboticabal pela excelente estrutura oferecida.

A todos os funcionários do Departamento de Solos e Adubos, em especial à Claudia Campos Dela Marta, por todo apoio oferecido durante a condução do experimento.

Aos funcionários da Fazenda de Ensino, Pesquisa e Produção, em especial ao Marcelo Scatolin, por toda atenção e apoio oferecidos.

Ao Prof. Dr. José Eduardo Corá e à Profa. Dra. Carolina Fernandes, por cederem o uso do laboratório de análises físicas do solo.

Aos meus grandes amigos Edimar Rodrigues Soares e Esmeralda Ochoa Martinez, pela amizade sincera e por toda colaboração durante essa jornada.

Aos amigos de pós-graduação Samira Furtado de Queiroz, André Mendes Coutinho Neto, Marcelo Jara Davalo, Marcelo Barbosa e Viviane Modesto, por toda colaboração durante a condução deste experimento.

Ao Dr. Hugo Tosi por ter cedido o esterco bovino utilizado no presente trabalho.

Aos meus irmãos Marcos Silveira da Silva e Josimara Silveira da Silva, por todo apoio ofertado.

À Prefeitura de Ribeirão Preto, representada pela Coordenadoria de Limpeza Urbana, por ter me permitido efetuar a pós-graduação;

Aos membros da banca: Prof. Dr. Manoel Evaristo Ferreira, Prof. Dr. José Ricardo Mantovani, Prof. Dr. Felipe Batistella Filho e Prof. Dr. Itamar Andrioli.

## SUMÁRIO

	Página
RESUMO.....	ii
ABSTRACT .....	iii
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA .....	3
2.1. Produção de esterco bovino .....	3
2.2. Adubação orgânica e alterações nos atributos químicos do solo .....	4
2.3. Adubação orgânica e alterações nos atributos físicos do solo.....	11
2.4. A cultura do milho .....	17
2.5. Respostas à adubação nitrogenada.....	18
2.6. Créditos de nitrogênio .....	20
3. MATERIAL E MÉTODOS .....	24
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	31
4.1. Efeitos da aplicação do esterco bovino em atributos químicos do solo .....	31
4.2. Efeitos da aplicação do esterco bovino nos atributos físicos do solo.....	47
4.3. Teores de nitrogênio em função de doses de esterco bovino na folha usada para diagnose nutricional do milho.....	56
4.4. Matéria seca e acúmulo de nitrogênio nas plantas de milho adubadas com esterco .....	58
4.5. Produtividade de grãos de milho.....	61
4.6. Créditos de nitrogênio .....	64
5. CONCLUSÕES .....	68
6. REFERÊNCIAS.....	69

## EFEITOS DE ESTERCO BOVINO EM ATRIBUTOS QUÍMICOS E FÍSICOS DO SOLO, PRODUTIVIDADE DE MILHO E CRÉDITOS DE NITROGÊNIO

**RESUMO** - O esterco bovino, além de fornecer nutrientes, quando utilizado repetidamente e/ou em grandes quantidades, pode melhorar outros atributos químicos e físicos do solo. Porém, um dos grandes desafios na sua utilização é estimar a quantidade de N que é fornecida durante o ciclo das culturas. Os objetivos com este trabalho foram determinar as alterações nos atributos químicos e físicos do solo, a produtividade de milho e os créditos de nitrogênio derivados da aplicação de esterco bovino e de seu efeito residual. Para alcançá-los foram conduzidos, simultaneamente, dois experimentos, no município de Jaboticabal-SP, em Latossolo Vermelho eutroférico muito argiloso, durante os anos agrícolas 2011/12; 2012/13; 2013/14 e 2014/15. Ambos os experimentos foram conduzidos em blocos casualizados com quatro repetições. Um dos experimentos foi conduzido para determinar a curva de resposta da cultura do milho ao N, e por meio desta calcular os créditos de nitrogênio provenientes da aplicação do esterco. Para isso, foram aplicadas as doses 0, 60, 90, 120, 180 e 240 kg ha<sup>-1</sup> de N-ureia. No outro experimento foram avaliados os efeitos no solo e na planta da aplicação de 0, 5, 10, 15, 30, 45 e 60 Mg ha<sup>-1</sup> de esterco bovino e de seu efeito residual, sendo a aplicação do adubo realizada apenas nos dois primeiros anos. Houve melhoria nos atributos químicos do solo pela aplicação de esterco bovino, e a duração dos efeitos foi variável, de modo que para os nutrientes (P, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> e K<sup>+</sup>) houve efeito residual e para as variáveis relativas à acidez do solo (pH e H+Al) o efeito não persistiu após a interrupção da aplicação. O teor de carbono orgânico do solo aumentou linearmente com o aumento das doses de esterco, o que levou ao aumento no diâmetro médio dos agregados e na macroporosidade, e diminuição na densidade, mesmo após a interrupção da aplicação do esterco por dois anos e em solo manejado de forma mecânica anualmente. A aplicação de até 60 Mg ha<sup>-1</sup> de esterco bovino durante dois anos consecutivos propiciou aumentos na produtividade de grãos de milho nos dois anos de aplicação e nos dois anos de avaliação do efeito residual, sendo que a produtividade média nos anos de aplicação de esterco foi 59% maior. Os créditos de N devidos à aplicação de esterco bovino variaram de 5 a 122 kg ha<sup>-1</sup> de N considerando aplicação e efeito residual do adubo e os maiores créditos foram obtidos com a aplicação de 30, 45, 60 e 60 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente no primeiro, segundo, terceiro e quarto anos de avaliações.

**Palavras-chave:** adubação nitrogenada, adubo orgânico, carbono orgânico do solo, valor de substituição do nitrogênio, *Zea mays* (L.)

## EFFECTS OF CATTLE MANURE ON CHEMICAL AND PHYSICAL ATTRIBUTES OF THE SOIL, CORN YIELD AND NITROGEN CREDITS

**ABSTRACT** - The use of cattle manure, in addition to providing nutrients, when used repeatedly and/or in large quantities, can improve other chemical and physical attributes of the soil. However, one of the major challenges in its use is to estimate the amount of N that is supplied during the crop cycle. The aims of the trials were to evaluate the changes in soil chemical and physical attributes, corn yield and nitrogen credits from the application of cattle manure and its residual effect. In this perspective, two experiments were conducted, simultaneously, in the municipality of Jaboticabal-SP, in an Typic Eutrudox, during the crop seasons 2011/12; 2012/13; 2013/14 and 2014/15. Both trials were conducted in a randomized block with four replicates. One of the trials was conducted to determine the response curve of the corn crop to the N, and through this calculate the nitrogen credits from the application of manure. Rates of 0; 60; 90; 120; 180 and 240 kg ha<sup>-1</sup> N-urea. In the other trial, the effects on the soil and on plant of the application of 0, 5, 10, 15, 30, 45 and 60 Mg ha<sup>-1</sup> of cattle manure and its residual effect were evaluated, applying the fertilizer only in the two first years. There was an enhancement in the chemical attributes of the soil by the application of cattle manure, and the continuance of the effects was variable, so that nutrients (P, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> and K<sup>+</sup>) had a residual effect and for the variables related to soil acidity (pH and H+ Al) the effect did not persist after the application interruption. The organic carbon content of the soil increased linearly as the rates of manure were increased, which led to the increase in the mean weight diameter of the aggregates and the macroporosity, and decrease in the bulk density, even after the interruption of the application of manure for two years and in a soil plowed annually. The application of up to 60 Mg ha<sup>-1</sup> of cattle manure during two consecutive years resulted in increases in grain yield of corn in the two years of application and in the two years of evaluation of the residual effect, and the average yield in the period of application of manure was 59% higher. The N credits due to the application of cattle manure ranged from 5 to 122 kg ha<sup>-1</sup> of N considering the application and residual effect of the fertilizer and the highest credits were obtained with the application of 30, 45, 60 and 60 Mg ha<sup>-1</sup>, respectively in the first, second, third and fourth years of evaluations.

**Keywords:** nitrogen fertilization, organic fertilizer, soil organic carbon, nitrogen fertilizer replacement value, *Zea mays* (L.)

## 1. INTRODUÇÃO

O milho é um dos cereais mais cultivados no mundo e seu cultivo está amplamente relacionado com a produção animal, sendo que grande parte da produção dessa gramínea é utilizada para fabricação de ração ou silagem. Parte expressiva dos custos no sistema de produção deste cereal é representada pelos fertilizantes nitrogenados, visto que a quantidade de nitrogênio nos solos é baixa e a demanda da cultura por este nutriente é alta quando se visa obter elevadas produtividades de grãos ou biomassa.

Em locais próximos a regiões produtoras de gado, principalmente nas áreas próximas a confinamentos, a utilização do esterco produzido é estratégica para suprir parte do nitrogênio exigido pelas culturas e, desta forma, propiciar retorno dos nutrientes extraídos das áreas e também diminuição no consumo de fertilizantes sintéticos. Uma vantagem do esterco bovino sobre os fertilizantes sintéticos é que, além do fornecimento de N e de outros nutrientes, pode ocorrer melhoria em uma série de atributos químicos e físicos do solo, como teor de matéria orgânica, CTC, pH do solo, agregação, porosidade e densidade do solo, entre outros.

Uma desvantagem do uso do esterco bovino no fornecimento de N é a dificuldade de sincronizar o período de maior demanda da cultura com a mineralização do N orgânico, proporcionando desta forma maior produtividade e retorno econômico. A dificuldade existe porque a taxa de mineralização depende da composição e do tratamento aplicado ao resíduo e também está associada às condições edafoclimáticas como temperatura, precipitação e textura do solo. A combinação de todas estas variáveis torna difícil estimar a quantidade de N que será fornecida em dado intervalo de tempo para a cultura, assim como prever em quanto tempo a mineralização estará completa.

Uma forma de aumentar a eficiência da recomendação da adubação orgânica é baseá-la em créditos de nitrogênio, termo empregado para definir a quantidade de N que pode ser subtraída da adubação com fertilizante sintético devida à aplicação do adubo orgânico (Lory et al., 1995). De modo geral, os créditos de N são baseados apenas na liberação de N no primeiro ano agrícola, devida à dificuldade em atribuir os créditos de N aos adubos orgânicos advindos do seu efeito residual, o

que não é adequado porque pode comprometer a produtividade e aumentar os custos de produção.

Deste modo, trabalhou-se com as hipóteses: (i) a adição de esterco bovino promove alterações nos atributos químicos e físicos do solo que levam a ganho de qualidade do solo e de produtividade de milho; (ii) é possível definir a quantidade de N que pode ser subtraída do programa de adubação em áreas de aplicação de esterco bovino.

Assim, os objetivos com este trabalho foram: (i) determinar as alterações nos atributos químicos e físicos do solo em função da aplicação de esterco bovino e do seu efeito residual; (ii) determinar a produtividade de grãos de milho nas condições de aplicação e de avaliação de efeito residual de esterco bovino; (iii) calcular os créditos de N provenientes da aplicação de esterco bovino e de seu efeito residual.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1. Produção de esterco bovino

O setor agropecuário vem se destacando ano após ano como um dos principais responsáveis pelo crescimento econômico brasileiro. Um dos setores que ocupa lugar de destaque dentro deste cenário é a pecuária, sendo que o Brasil possui um dos maiores rebanhos bovinos comerciais do mundo. Entre os gargalos existentes no setor, principalmente no sistema extensivo, pode-se citar a demora entre o desmame e abate dos animais, o que está relacionada à baixa disponibilidade e qualidade dos alimentos fornecidos, principalmente durante o período de seca.

No Brasil, a partir da década de 80, com o intuito de reduzir o período entre a desmama e o abate, houve aumento expressivo na quantidade de animais terminados em confinamentos, acarretando maior disponibilidade de dejetos. Como o aproveitamento dos nutrientes presentes nos alimentos é baixo, os dejetos representam forma importante de reciclagem de nutrientes no sistema, em especial do nitrogênio (N), pois 75 a 80% de todo o N ingerido pelos animais é excretado (Chang e Janzen, 1996).

Considerando o número de bovinos terminados em confinamento em 2017 (3,08 milhões), e a produção diária de fezes por animal (1,25 a 3,07 kg de matéria seca), foram gerados 6.659,3 Mg dia<sup>-1</sup> de esterco seco, com quantidades de N variando entre 59,9 e 214,4 Mg dia<sup>-1</sup>, considerando a concentração de N no esterco entre 0,9 a 3,22% (Schroder et al., 2013). A variação na produção de esterco e a sua composição apresentam relações estreitas com a raça, a idade do animal e a alimentação, sendo que a dieta baseada em alimentos mais concentrados resulta em menor produção de esterco, enquanto que o fornecimento de alimentos mais volumosos propicia maior produção desse insumo.

Ressalta-se que essa quantidade de esterco é baseada apenas nos bovinos terminados em confinamento, desconsiderando a produção de esterco bovino nos sistemas extensivos, o qual responde por cerca de 90% do total de abates no Brasil. Além da pecuária, o Brasil também se destaca na produção de aves, suínos, caprinos, ovinos e na agroindústria, evidenciando dessa forma o potencial para

reciclagem dos nutrientes presentes nos resíduos originados nessas atividades. No entanto, a baixa concentração de nutrientes nos esterco inviabiliza seu transporte a locais distantes. Embora a adição de adubos orgânicos ao solo promova diversos benefícios, seu uso ainda é pouco difundido pelos agricultores brasileiros, uma vez que os ganhos econômicos e ambientais promovidos pelo uso dessas fontes são difíceis de mensurar.

## **2.2. Adubação orgânica e alterações nos atributos químicos do solo**

Um dos principais fatores para a obtenção de estabilidade, produtividade e sustentabilidade dos agroecossistemas é a manutenção e a melhoria da qualidade do solo (Stark e Porter, 2005). A aplicação de materiais orgânicos ao solo contribui para o aumento do teor de MO e, conseqüentemente, na melhoria das características físicas, químicas e biológicas do solo (Ourives et al., 2010).

De acordo com a legislação brasileira, os fertilizantes orgânicos são classificados nas categorias simples, misto, composto e organominerais, sendo os esterco de animais pertencentes à categoria dos fertilizantes orgânicos simples (MAPA, 2009). Adubos orgânicos usados na agricultura são originados principalmente de resíduos gerados na criação de animais e em processos agroindustriais. Eles constituem fonte importante de nutrientes para as plantas e de MO para o solo. Os adubos orgânicos utilizados como fontes de N e outros nutrientes nas lavouras englobam os esterco bovino, suíno e de galinha, lodo de esgoto, tortas vegetais, torta de filtro, vinhaça, camas aviárias e outros.

Fontes orgânicas de nutrientes como os esterco podem reduzir a quantidade de fertilizantes sintéticos, em particular os nitrogenados (Paul e Beauchamp, 1993). A concentração de N nesses fertilizantes é muito variável, geralmente entre 0,6 a 4,6% (Melo et al., 2008), e depende da espécie animal, da alimentação e das reações químicas que ocorrem durante a armazenagem (Asagi e Ueno, 2009; Mallory et al., 2010).

O manejo do adubo orgânico é mais complexo do que quando se utilizam fertilizantes sintéticos, uma vez que a liberação de nutrientes, como o N, em formas disponíveis às plantas, é dependente do processo de mineralização, e apenas uma

fração do N-orgânico é mineralizada no ano em que ele é aplicado (Mallory et al., 2010). Entender a liberação do N proveniente dos adubos orgânicos é fundamental para propiciar maiores produtividades e também reduzir os riscos potenciais de poluição dos lençóis freáticos (Paul e Beauchamp, 1993).

A fração de N-orgânico do esterco bovino que é mineralizada no primeiro ano varia, segundo alguns autores, entre 21 a 35% (Pratt et al., 1973; Klausner et al., 1994; Eghball e Power, 1999). Com utilização de composto de esterco bovino a taxa de mineralização é de 20%. Essa variabilidade é resultado da dependência existente entre atividade dos microrganismos presentes no solo e fatores como temperatura, umidade do solo, propriedades físico-químicas do solo e características do material orgânico (Eghball et al., 2004; Asagi e Ueno, 2009; Mallory et al., 2010).

Como apenas uma fração do N e de outros nutrientes se torna disponível no ano de aplicação dos adubos orgânicos, e apenas uma fração do carbono é oxidada neste primeiro momento, há expectativa de que ocorram alterações nos atributos do solo e na produtividade das culturas nos anos subsequentes (Eghball, 2002; Eghball, 2003). Com relação ao N, os percentuais que são mineralizados no segundo, terceiro e quarto anos agrícolas foram avaliados em, respectivamente, 20, 10 e 5% (Eghball e Power, 1999). Schröder et al. (2007) determinaram, por sua vez, taxa de mineralização entre 0,10 e 0,33 para o ano de aplicação e de 0,10 para os anos subsequentes.

A relação entre os teores de N na forma mineral e orgânica de um adubo orgânico se constitui em excelente referencial para estimar a disponibilidade imediata de N, além de servir como base para avaliar a contribuição residual da fonte, sendo que quanto menor for a relação, maior será o efeito residual, uma vez que a proporção de N na forma orgânica será maior (Schröder et al., 2013).

A magnitude dos efeitos da aplicação de resíduos orgânicos e a persistência dos efeitos dependerão das condições edafoclimáticas, da quantidade aplicada e da frequência das aplicações, conforme resultados obtidos por Benke et al. (2010), que verificaram aumento de 1,3 e 2,1 vezes no N disponível no solo durante o ano de aplicação de 80 e 160 Mg ha<sup>-1</sup> de esterco bovino, respectivamente. Com o passar do tempo, os teores de N no solo diminuiram, mas no tratamento com a maior dose de esterco eles ainda eram maiores em relação ao do tratamento controle no terceiro

ano de avaliação do efeito residual. Para os autores, o aumento no teor de N disponível com a adição de esterco é reflexo do suprimento de N inorgânico já presente no esterco, e principalmente da mineralização do N orgânico do esterco.

Avaliando o fornecimento de N de adubos orgânicos (biossólidos e esterco bovino) e sintético (nitrato de cálcio) no ano de aplicação, e o efeito residual, Schröder et al. (2007) constataram que houve efeito positivo na produtividade de gramínea forrageira no ano de aplicação e também que o efeito residual dos adubos orgânicos foi significativamente maior no fornecimento de N, propiciando incrementos na produtividade da forrageira, ao contrário do observado para o fertilizante sintético.

Paul e Beauchamp (1993) verificaram que uma aplicação de fertilizantes orgânicos (esterco líquido de bovinos leiteiros; esterco bovino e composto de esterco bovino) com o intuito de fornecer 100, 200 e 300 kg ha<sup>-1</sup> de N promoveu efeitos residuais na produtividade de milho nos dois anos subsequentes, o que não ocorreu com a ureia. Com relação ao suprimento de N em função das fontes de adubos orgânicos, foi verificado que o esterco bovino e o composto de esterco bovino propiciaram menores efeitos em relação à ureia, no ano de aplicação. No entanto, as maiores respostas no segundo ano foram obtidas com a utilização dos adubos orgânicos. No ano de aplicação dos adubos as taxas de recuperação do N pela cultura do milho foram 54,6; 16,2; 10,5 e 5,1%, respectivamente para ureia, esterco líquido de bovinos leiteiros, esterco bovino e composto de esterco bovino. No primeiro ano de avaliação do efeito residual, as taxas foram, respectivamente, 1,8; 8,8; 3,5 e 2,9% e, no segundo ano, foram de 0; 2,3; 7,4 e 5,5%, obedecendo à mesma ordem de adubos citada anteriormente.

Além do fornecimento de N, a adição de adubos orgânicos ao solo também promove melhorias em outros atributos, como aumentos nos teores de MO do solo (Eghball, 2002), nos teores de P-total e P-disponível (Eghball e Power, 1999), K<sup>+</sup> Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> e Zn<sup>2+</sup> (Chang et al., 1990; Eghball, 2002) e também dos demais nutrientes. Os incrementos nos teores dos nutrientes no solo com a aplicação de adubos orgânicos no ano de aplicação do insumo e nos anos subsequentes dependerão de alguns fatores como a quantidade aplicada do insumo, a taxa de mineralização e a fração prontamente disponível às plantas, que no

esterco bovino foi determinada em 70, 100 55, 55, 40% respectivamente para o P, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2</sup> e S (Eghball, 2002).

Eghball e Power (1999) verificaram incrementos lineares nos teores de P no solo à medida que aumentaram as quantidades adicionadas de P via esterco bovino, de modo que para cada 100 kg de P adicionado, o aumento foi de 33 mg kg<sup>-1</sup> de P no solo (Bray 1). No tratamento em que se aplicaram as maiores doses, o total adicionado foi de 600 kg ha<sup>-1</sup> de P, e o teor no solo foi de 231 mg kg<sup>-1</sup> de P (Bray 1). Os efeitos observados nos incrementos de P no solo também se refletiram durante o período de avaliação do efeito residual, sendo que os teores desse nutriente no solo no tratamento que recebeu a maior dose eram suficientes para propiciar dez cultivos consecutivos de milho sem adição de P, considerando a taxa de exportação de P pela cultura (Eghball e Power, 1999)

Gilley e Eghball (2002) verificaram que no tratamento em que todo o N exigido pela cultura do milho foi fornecido como composto de esterco bovino, os teores de P no solo eram maiores, mesmo quatro anos após a última aplicação, o que está relacionado às doses elevadas de composto de esterco bovino, à baixa exportação e perdas desse nutriente no solo, e ao fato de que 30% do P nesse insumo estava na forma orgânica, não sendo totalmente mineralizados no ano de aplicação (Eghball, 2002).

Aumento na disponibilidade de P também foi constatado em função da adição de adubos orgânicos, o que é relacionado ao fornecimento de P e também à adsorção de substâncias húmicas e ácidos orgânicos aos sítios de troca que seriam ocupados pelo fosfato, resultando em menor capacidade de adsorção deste nutriente pelos coloides inorgânicos do solo (Reddy et al., 1980; Hue e Licudine, 1999). Estes compostos aumentam de concentração no solo pela ação de decomposição dos resíduos orgânicos, ou pela síntese de novos compostos pelos microrganismos do solo. Deste modo, em um sistema em que o manejo adotado propicie aumento na quantidade de MO do solo, haverá diminuição na capacidade de adsorção e na energia de ligação dos fosfatos aos grupos funcionais dos coloides inorgânicos do solo, resultando em maior eficiência de uso dos adubos fosfatados (Reddy et al., 1980).

Respostas positivas nos teores de Ca, K, P e Zn no solo também são obtidas com a aplicação de outros adubos orgânicos, como o esterco de galinha, sendo que a cada Mg aplicada desse insumo, houve aumento de  $1,1 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$  de  $\text{Ca}^{2+}$ ;  $0,1 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$  de  $\text{K}^+$ ;  $1,75 \text{ mg dm}^{-3}$  de P e  $0,56 \text{ mg dm}^{-3}$  de  $\text{Zn}^{2+}$  no solo (Eguchi et al., 2016).

Além do fornecimento de nutrientes, a adição de adubos orgânicos ao solo pode promover incrementos no teor de MO e, conseqüentemente, propiciar aumento na capacidade de troca catiônica (CTC), aumento no pH, complexação de  $\text{Al}^{3+}$ , aumento na atividade microbiológica, melhoria na disponibilidade de P (Whalen et al., 2000; Haynes e Mokolobate, 2001; Ano e Ubochi, 2007; Ourives et al., 2010). A persistência dos efeitos pode ser mais duradoura para algumas características do que para outras, conforme constatado por Benke et al. (2010), que verificaram que o efeito do esterco bovino, mesmo após quatro anos da aplicação, foi suficiente para manter os teores de  $\text{Al}^{3+}$  inferiores aos obtidos no controle.

A quantidade de MO em solos de regiões tropicais geralmente é baixa, mas, apesar de baixa, ela contribui com até 80% da CTC dos solos destas regiões. Assim, a manutenção ou aumento da quantidade de MO é essencial para manter ou aumentar a CTC. Esta grande contribuição da MO na CTC do solo se deve ao grande número de grupos funcionais (carboxílicos, fenólicos, quinonas, semiquinonas, aldeído, álcool, amina, ester e éter) e elevada superfície específica do húmus (Bayer e Mielniczuk, 2008).

Dependendo das quantidades adicionadas, da frequência de aplicação e do manejo adotado na área de aplicação do adubo orgânico, os aumentos no teor de MO serão de maior ou de menor expressão. Sommerfeldt e Chang (1985), após a adição de esterco bovino durante onze anos consecutivos em áreas não irrigadas, verificaram aumentos de  $20,8 \text{ g kg}^{-1}$  de MO ao comparar os teores obtidos com a maior dose ( $90 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) e os obtidos no controle. Em área irrigada, o incremento foi de  $34,1 \text{ g kg}^{-1}$  usando  $60 \text{ Mg ha}^{-1}$  de esterco, portanto, aumento maior do que o obtido com a maior dose na área não irrigada. A diferença entre a maior dose aplicada na área irrigada ( $180 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) e o controle foi de  $44,1 \text{ g kg}^{-1}$  de MO.

Respostas como as anteriormente relatadas também foram obtidas por Miller et al. (2002), que trabalhando em experimento de longa duração (24 anos),

verificaram aumentos significativos nos teores de carbono orgânico do solo (COS) após a aplicação de doses de esterco variando entre 0 e 90 Mg ha<sup>-1</sup> em área não irrigada e entre 0 e 180 Mg ha<sup>-1</sup> em área irrigada. Os teores de COS no experimento não irrigado foram de 20,3 g kg<sup>-1</sup> no tratamento controle e de 59,9 g kg<sup>-1</sup> com a maior dose, enquanto os valores obtidos no experimento irrigado na maior e na menor dose foram respectivamente de 23,5 g kg<sup>-1</sup> e 90,1 g kg<sup>-1</sup>.

A quantidade de C orgânico que fica na estrutura da MO do solo após as transformações do adubo orgânico varia com o grau de estabilização do adubo. Após quatro aplicações de adubos orgânicos ficaram retidos 25% do C adicionado na forma de esterco fresco, e 36% do C aplicado como composto de esterco (Eghball, 2002). Para o autor, a maior porcentagem obtida com o composto de esterco é devida aos compostos carbônicos mais estáveis nesse insumo, uma vez que parte dos materiais mais lábeis foram oxidados na compostagem.

Com a adubação orgânica também podem ocorrer alterações em outros atributos, como o aumento do valor de pH do solo. O mecanismo exato que explica o aumento ainda é desconhecido, mas há na literatura menção aos seguintes processos: a) oxidação de ácidos orgânicos com consumo de H<sup>+</sup> durante a decomposição dos resíduos orgânicos ( $R-CO-COO^- + H^+ \rightarrow R-CHO + CO_2$ ); b) amonificação dos resíduos nitrogenados com liberação de OH<sup>-</sup> durante a decomposição inicial dos materiais orgânicos ( $NH_3 + H_2O \rightarrow NH_4^+ + OH^-$ ); c) adsorção específica de moléculas orgânicas aos oxidróxidos de Fe e Al com liberação de OH<sup>-</sup>; d) presença de CaCO<sub>3</sub> nos dejetos dos animais (Eghball, 1999; Tang et al., 1999; Haynes e Mokolobate, 2001), e outros mecanismos que serão apresentados a seguir.

A diminuição da acidez do solo com aplicação de esterco bovino é muitas vezes explicada pela presença de CaCO<sub>3</sub> nos dejetos dos animais, visto que ele é fornecido na dieta e não é totalmente metabolizado pelos bovinos (Eghball, 1999). Para Naramabuye e Haynes (2006) o aumento no valor de pH do solo com a adição de esterco bovino é consequência principalmente do pH elevado desses insumos e também pela presença de carbonatos de cálcio e de magnésio.

Babalola et al. (2012), avaliando as alterações nos atributos físico-químicos do solo em função de três doses de composto, verificaram aumentos significativos

no pH do solo após a primeira aplicação, e relacionaram este resultado à degradação de compostos ácidos com grupos carboxílicos e fenólicos. Tripathi et al. (2014), em estudo de longa duração (41 anos) com fontes de fertilizantes, verificaram que a adição de esterco aumentou o pH do solo, o que foi relacionado à complexação do  $Al^{3+}$  por compostos orgânicos e liberação concomitante de cátions básicos.

A magnitude do aumento no valor de pH com a aplicação de esterco varia em função das espécies de animais, conforme constatado por Ano e Ubochi (2007). Os autores verificaram aumento do pH e diminuição da acidez potencial em função das fontes utilizadas, na seguinte ordem: esterco de aves > esterco de coelho > esterco suíno > esterco bovino > esterco de cabra. Para os autores, o aumento no valor de pH do solo é resultante da descarboxilação do complexo cálcio-matéria orgânica pela ação de microrganismos do solo, processo no qual ocorre liberação de grupos  $OH^-$  que, em seguida, reagem com  $H^+$  e  $Al^{3+}$ .

Resultados semelhantes foram relatados por Naramabuye e Haynes (2006), mas, para estes autores, o processo predominante no aumento do pH foi a presença de  $CaCO_3$  nos estercos, embora outros processos, como a descarboxilação dos ácidos orgânicos durante a decomposição dos adubos orgânicos também possa implicar no consumo de prótons  $H^+$  do solo. Naramabuye e Haynes (2006) também constataram que os teores de  $Al^{3+}$  diminuíram seguindo a mesma ordem de efeito no pH do solo: esterco de aves > esterco suíno > esterco bovino. O teor de  $Al^{3+}$  no tratamento com esterco de aves foi menor que o obtido no controle em 90%. No tratamento com esterco suíno foi obtida diminuição de 75% no teor desse cátion e, quando utilizado o esterco bovino, o teor de  $Al^{3+}$  foi 60% menor em relação ao controle. Para os autores, essa diminuição no teor de  $Al^{3+}$  é devida a dois fatores, sendo um associado ao aumento do pH e o outro à complexação do  $Al^{3+}$  por compostos orgânicos. Com o aumento do pH do solo, há a conversão de  $Al^{3+}$  em  $AlOH^{2+}$ ;  $Al(OH)_2^+$  e  $Al(OH)_3$ , reduzindo a toxicidade que esse elemento causa nas plantas.

Paralelamente aos efeitos já mencionados com a adubação orgânica, evidencia-se também a complexação de metais como Fe, Mn e Cu com os ácidos orgânicos ou substâncias húmicas, promovendo desta forma diminuição na

disponibilidade destes nutrientes (Stevenson e Vance, 1989). A complexação de metais pelos compostos orgânicos é um mecanismo muito importante do ponto de vista ambiental, pois diminui a fitodisponibilidade e a mobilidade dos metais no perfil do solo (Tsutiya et al., 2002).

Apesar dos benefícios da utilização de adubos orgânicos, estes apresentam algumas desvantagens, como a baixa concentração de nutrientes, o que implica em maior custo com transporte e, em alguns casos, pode haver também a introdução de plantas daninhas (Stark e Porter, 2005). Para estes autores, este maior custo com transporte pode ser justificado em longo prazo por causa dos efeitos positivos nos componentes biológicos, físicos e químicos do sistema de produção, embora seja difícil mensurar esses benefícios.

### **2.3. Adubação orgânica e alterações nos atributos físicos do solo**

O solo é um recurso natural que deve ser manejado de forma sustentável para que possa atender às futuras gerações. A degradação do solo é um sério problema mundial, e há fortes evidências de que este problema representa uma ameaça para produção de biomassa e também para a produtividade das culturas, principalmente em longo prazo. Há necessidade de reduzir os impactos do cultivo sobre o solo, controlando particularmente a degradação de sua estrutura (Pagliai et al., 2004).

A estrutura do solo é determinada pelo arranjo espacial das suas partículas constituintes e da intensidade da união entre elas. O arranjo espacial das partículas do solo determina o volume poroso, além de influenciar as propriedades de transferência de massa e energia, enquanto as uniões entre partículas condicionam a resistência do solo (Barral et al., 1998).

A estabilidade da estrutura do solo é a capacidade que ele possui de mantê-la inalterada quando exposto a estresses, e uma boa estrutura do solo é uma das características mais desejáveis para manter a produtividade agrícola e preservar a qualidade do meio ambiente. A presença de agregados estáveis é um dos pré-requisitos para a boa estrutura do solo. A agregação do solo é definida como o processo pelo qual partículas de diferentes tamanhos se unem por meio de agentes cimentantes (Tisdall e Oades, 1982), sendo a floculação da argila um dos pré-

requisitos para que o processo ocorra (Lynch e Bragg, 1985; Oades, 1993). O processo de agregação nos solos é influenciado por fatores como teor de MO e umidade do solo, atividade dos microrganismos, tipo de culturas, desenvolvimento das raízes, sistema de manejo e uso de adubos e corretivos (Simansky, 2012).

Para haver formação dos agregados no solo são necessárias duas condições fundamentais, sendo a primeira relacionada à presença de uma força mecânica qualquer que promova a aproximação das partículas do solo. Este movimento pode ser resultante do crescimento das raízes, do deslocamento de animais de hábito terrestre, pelo fenômeno da expansão e contração do solo provocado pelo molhamento e secamento alternado, ou pela floculação. A segunda condição é que após o contato das partículas haja um agente cimentante para consolidar essa união, gerando o agregado (Simansky, 2012).

Existem duas classes de agentes cimentantes: os inorgânicos e os orgânicos, sendo os primeiros constituídos principalmente por componentes da fração argila, cátions polivalentes como  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$  e  $\text{Al}^{3+}$ , óxidos e hidróxidos de Fe e de Al e carbonatos de cálcio e de magnésio. Os agentes cimentantes orgânicos são classificados em função da idade e do grau de estabilização da MO em: transientes, temporários e persistentes (Oades, 1993).

Os agentes cimentantes transientes têm como característica a degradação rápida pelos microrganismos do solo, e estão inclusos nesta categoria polissacarídeos derivados de plantas e de microrganismos do solo. Os agentes cimentantes temporários são representados por raízes, hifas, e alguns fungos, enquanto os agentes cimentantes persistentes consistem de substâncias húmicas aromáticas associadas com metais catiônicos e polímeros fortemente adsorvidos (Tisdall e Oades, 1982). As substâncias húmicas aromáticas estão protegidas fisicamente no interior dos agregados formados por partículas pertencentes às frações silte e argila, e são derivadas de fragmentos de raízes resistentes, hifas e células bacterianas (Skjemstad et al., 1993).

A classificação de agregados do solo em classes de tamanho, assim como a sua estabilidade são indicadores importantes para a qualidade física do solo, refletindo o impacto do uso e manejo do solo na agregação e degradação deste recurso (Castro Filho et al., 2002). Ao avaliar a agregação dos solos, o interesse

agronômico volta-se para a distribuição de tamanhos, quantidade e estabilidade dos agregados, pois esses fatores de agregação são importantes na determinação da quantidade e distribuição dos espaços porosos e, ainda, na suscetibilidade dos agregados à ação erosiva da água e do vento (Barral et al., 1998).

De maneira geral, pode-se estabelecer que os microagregados são oriundos principalmente de processos físico-químicos, como floculação, adsorção, troca de ligantes e atração eletrostática, sendo a MO humificada uma das principais responsáveis pela sua estabilidade, além dos minerais da fração argila, principalmente os óxidos em solos altamente intemperizados (Tisdall e Oades, 1982). Devido à recalcitrância dos agentes orgânicos responsáveis pela estabilização desses agregados, são observadas poucas alterações nessa classe de agregados em decorrência do uso e manejo do solo, sendo isso mais relacionado ao tipo de solo (Jastrow e Miller, 1998).

A formação dos macroagregados, por outro lado, pode estar mais relacionada ao efeito biológico, e sua estabilidade depende do suprimento constante de resíduos vegetais para repor os compostos orgânicos transitórios, como os polissacarídeos de origem microbiana, e também os temporários, como as hifas de fungos e as raízes finas (Jastrow e Miller, 1998). A MO é o principal agente de ligação que proporciona estabilidade aos agregados do solo, enquanto os agregados propiciam proteção para a MO e agem como importante reservatório de carbono e também de nutrientes (Tisdall e Oades, 1982).

Como a MO é um dos principais agentes de formação e de estabilização de agregados, a diminuição do seu conteúdo pelo cultivo é uma das principais causas de desagregação do solo. Como, a partir da agregação, indiretamente, são afetadas outras características físicas do solo como densidade, resistência à penetração, porosidade total, distribuição do tamanho dos poros, aeração, capacidade de retenção e infiltração de água, consistência e máxima compactabilidade do solo (Haynes e Swift, 1990; Klein et al., 1998; Bayer e Mielniczuk, 2008), a diminuição do teor da MO do solo desencadeia uma série de alterações nos atributos físicos que são associados à perda de qualidade do solo.

O acúmulo de MO resulta também em maior proteção contra a erosão hídrica, por aumentar a infiltração de água no solo devido ao aumento na porosidade, o que

irá propiciar menor escoamento superficial (Yagüe et al., 2016). O carbono presente no esterco apresenta maior valor do que os nutrientes, quando aplicado em solos com baixos teores de MO ou solos muito degradados, como os que sofreram erosão (Eghball, 2002). Para os autores, a ruptura de agregados está associada à ausência de agentes cimentantes orgânicos entre as partículas. A persistência desses agentes depende da composição dos compostos orgânicos, sendo de maior persistência os de maior complexidade (Tisdall e Oades, 1982).

Ao avaliar a influência de fertilizantes sintéticos (ureia, fosfato de cálcio e cloreto de potássio) e orgânicos (esterco de galinha e de suíno) nos indicadores de qualidade física do solo, Li et al. (2011) constataram maior porosidade total nos tratamentos com adubos orgânicos do que com a aplicação conjunta dos fertilizantes sintéticos. Os fertilizantes orgânicos também propiciaram aumentos na porcentagem de macro e mesoporos dentro da camada arável, sendo os maiores valores obtidos com o esterco de suíno. No entanto, a porcentagem de microporos diminuiu nesses tratamentos, sendo os maiores valores obtidos com o uso de fertilizantes sintéticos.

A aplicação de esterco bovino, isoladamente ou em combinação com fertilizante sintético (80; 40 e 40 kg ha<sup>-1</sup> respectivamente de N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O na estação chuvosa), resultou em aumento na formação de meso e macroagregados e diminuição nos microagregados. A incorporação do esterco propiciou aumentos da ordem de 165,33% na formação de macroagregados retidos nas peneiras entre 5-2 mm, e de 130 e 282%, respectivamente nos agregados retidos nas peneiras entre 2-1 mm e 1-0,5 mm (Tripathi et al., 2014). Os autores justificam esses aumentos pela secreção de substâncias mucilaginosas liberadas na decomposição do esterco, que propiciam a junção dos microagregados. A formação de agregados maiores propiciou, por sua vez, maior proteção, no seu interior, ao carbono e ao nitrogênio, de modo que as concentrações de ambos aumentaram com o aumento do tamanho do agregado.

Tripathi et al. (2014) também verificaram que o diâmetro médio geométrico dos agregados variou de 0,43 a 0,78 mm, sendo os menores valores obtidos no controle e os maiores no tratamento em que foram utilizados simultaneamente esterco bovino e fertilizante sintético. Ao utilizar apenas o esterco, o valor médio foi

de 0,65 mm, estatisticamente menor que os obtidos na combinação esterco mais fertilizante sintético.

Além dos efeitos observados na agregação e na porosidade do solo, pode haver diminuição na densidade do solo com a adição de adubos orgânicos, devido à mistura dos materiais de menor densidade presentes nesses materiais aos de maior densidade já presentes no solo, resultando desta forma em menor massa para um mesmo volume de solo (Haynes e Naidu, 1998).

Sommerfeldt e Chang (1985), trabalhando com aplicação de esterco bovino durante onze anos consecutivos, com doses variando entre 0 e 90 Mg ha<sup>-1</sup> para áreas sem irrigação e entre 0 e 180 Mg ha<sup>-1</sup> em áreas irrigadas, verificaram que a distribuição de classe de agregados não foi alterada pelas doses de esterco, provavelmente porque o solo já possuía boa estrutura antes da instalação do experimento. No entanto, a densidade diminuiu com o aumento das doses de esterco, sendo que na área sem irrigação a densidade foi de 0,96 Mg m<sup>-3</sup> no controle e de 0,78 Mg m<sup>-3</sup> com aplicação de 90 Mg ha<sup>-1</sup>. Na área irrigada os valores foram de 1,12 Mg m<sup>-3</sup> (controle) e 0,69 Mg m<sup>-3</sup> (180 Mg ha<sup>-1</sup>). Depois de 24 anos de aplicação dos mesmos tratamentos, foram obtidas densidades de 1,21 e 0,71 Mg m<sup>-3</sup>, respectivamente nos tratamentos controle e 90 Mg ha<sup>-1</sup> na área não irrigada. Na área irrigada a maior dose propiciou densidade de 0,59 Mg m<sup>-3</sup>, enquanto que no controle ela foi de 1,28 Mg m<sup>-3</sup> (Miller et al., 2002).

Eghball (2002) não verificou alterações na densidade do solo com aplicação de doses de até 93,9 Mg ha<sup>-1</sup> de esterco bovino e de até 69,4 Mg ha<sup>-1</sup> de composto de esterco bovino, embora os teores de carbono do solo tenham aumentado. Segundo o autor, a ausência de resposta ocorreu devido ao fato da quantidade de carbono orgânico adicionado ao solo ter sido insuficiente para promover alterações em um solo cujo teor original de C orgânico era de 31 g kg<sup>-1</sup>. Eguchi et al. (2016) também não verificaram alterações na densidade do solo, na microporosidade e na condutividade hidráulica, em solo adubado com doses de até 6,2 Mg ha<sup>-1</sup> de esterco de galinha.

Hou et al. (2012), por outro lado, verificaram que a densidade do solo no tratamento que recebeu esterco de galinha (22,5 Mg ha<sup>-1</sup>) e fertilizante sintético (255 kg ha<sup>-1</sup> de N + 90 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), a partir do terceiro ano de experimento, foi

menor do que a obtida no tratamento com uso exclusivo de fertilizantes sintéticos ( $255 \text{ kg ha}^{-1}$  de N +  $90 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ ). Esses resultados foram atribuídos ao aumento no teor de MO obtido com o uso combinado de esterco e fertilizante sintético, o que melhorou a agregação do solo e, conseqüentemente, aumentou os volumes de microporos e o crescimento das raízes.

Babalola et al. (2012) avaliaram as alterações físicas, químicas e biológicas do solo promovidas pelo efeito residual de um composto (esterco de aves e resíduos de plantas na proporção de 1:3, respectivamente), que foi aplicado duas vezes consecutivas nas doses 0, 10 e  $20 \text{ Mg ha}^{-1}$ , e constataram decréscimo de 4,8 % na densidade do solo, aumento de 15,7% na estabilidade de agregados medida pelo diâmetro médio ponderado e aumento de 2,9% na porosidade total em relação ao controle. Segundo os autores, as alterações obtidas nesses atributos estão relacionadas ao incremento nos teores de MO e à atividade microbiana do solo, a qual pode ter contribuído na formação e estabilização dos agregados por meio da produção de mucilagens que propiciam aumento da formação de microagregados.

Em solos com baixos teores de MO, compostos como os polissacarídeos são os mais importantes na agregação do solo, e a introdução de resíduos animais pode estimular a atividade microbiana e, conseqüentemente, a produção de polissacarídeos (Yagüe et al., 2016). Tisdall e Oades (1982) citam que a produção contínua de polissacarídeos pela microbiota do solo resulta em incrementos na estabilidade de agregados.

Práticas que propiciam aumento na agregação podem resultar em aumento da porosidade do solo, conforme constatado por Pagliai et al. (2004), que avaliando os efeitos de tipos de preparo do solo e adição de esterco bovino ( $10 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) e composto de esterco bovino (10 e  $40 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) no solo, verificaram, nos tratamentos com os adubos orgânicos, aumentos significativos na macroporosidade. A porcentagem de macroporos observada na ausência de esterco foi de 8,58%, enquanto que a adição de  $10 \text{ Mg ha}^{-1}$  de esterco bovino proporcionou acréscimo de 9,58% em relação ao valor obtido no controle. O uso de composto de esterco proporcionou, por sua vez, incrementos de 7,59 e 8,12%, respectivamente, com as doses de 10 e  $40 \text{ Mg ha}^{-1}$ , em relação ao obtido no controle.

Usando resíduos culturais e esterco bovino, Bhogal et al. (2009) verificaram que para cada 10 Mg ha<sup>-1</sup> de C aplicado via esterco houve aumento de 0,6% na porosidade do solo, de 2,5% na capacidade de água disponível e redução de 0,5% na densidade do solo, e não constataram respostas significativas dessas variáveis à aplicação de resíduos culturais.

#### **2.4. A cultura do milho**

A produção mundial de milho estimada para a safra 2016/2017, de acordo com o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos, foi de 1,037 bilhões de toneladas (USDA, 2017). O Brasil ocupa a terceira posição nesse ranking, com 86,5 milhões de toneladas, perdendo apenas para EUA e China, que produziram cerca de 384,78 e 219,55 milhões de toneladas, respectivamente.

A produção brasileira de milho está concentrada na Região Centro-Sul, onde se estima que seja de 79 milhões de toneladas, respondendo por cerca de 91% do total produzido no País. Os principais estados produtores são Mato Grosso, Paraná, Goiás, Mato Grosso do Sul e Minas Gerais, com produção estimada respectivamente de 23,2; 16,5; 9,2; 8,8 e 7,7 milhões de toneladas, produções que correspondem a cerca de 65% do total esperado para a safra 2016/2017. O Estado de São Paulo ocupa a sétima posição, com produção estimada de 4,3 milhões de toneladas (CONAB, 2017).

Embora o Brasil seja um dos principais produtores desse cereal, a produtividade média é baixa, sendo equivalente a 5.293 kg ha<sup>-1</sup> na safra 2015/2016 (CONAB, 2017). Há, portanto, um longo caminho a percorrer, com o intuito de aumentar esse índice, uma vez que a produtividade média norte americana na mesma safra foi maior do que 10.000 kg ha<sup>-1</sup>. Um aumento de 20% na produtividade média nacional representaria aumento de 26,35 milhões de toneladas na produção de grãos, incremento que representaria toda a produção da Argentina (USDA, 2017).

## 2.5. Respostas à adubação nitrogenada

Altas produtividades de milho têm sido garantidas pela adaptação dos cultivares às condições edafoclimáticas, resultado do melhoramento genético, e pelas melhorias nos atributos físicos, biológicos e químicos dos solos, devido ao emprego de práticas culturais corretas e também ao uso de quantidades adequadas de fertilizantes nitrogenados.

A cultura do milho é uma das mais exigentes em N e o suprimento inadequado deste nutriente é um dos principais fatores limitantes ao rendimento de grãos (Fornasier Filho, 2007). O N é um dos nutrientes que proporciona os maiores efeitos nos componentes de produção e produtividade da cultura, e sua aplicação pode interferir em diversas características da planta, as quais afetam direta ou indiretamente a produtividade (Cobucci, 1991).

Os efeitos da adubação nitrogenada podem ser observados no acúmulo de matéria seca, altura, área foliar, taxa fotossintética, número de grãos por espiga, diâmetro da espiga, tamanho da espiga, número de grãos por fileira, proteína nos grãos e massa de 1.000 grãos (Lemaire e Gastal, 1997; Ma et al., 2005; Uribe Larrea et al., 2009).

A produção de grãos e a massa das espigas com e sem palha são influenciadas pelo aumento nas doses de N, conforme observado no trabalho de Ferreira et al. (2001). Neste caso, a produção de espigas com palha, que foi de 11,48 Mg ha<sup>-1</sup>, foi obtida com 199,6 kg ha<sup>-1</sup> de N, enquanto as maiores produções de espigas sem palha e produtividade de grãos, respectivamente 10,48 Mg ha<sup>-1</sup> e 8,58 Mg ha<sup>-1</sup>, foram obtidas com a aplicação de 197 e 201 kg ha<sup>-1</sup> de N. Segundo os autores, o aumento na produtividade de grãos foi da ordem de 38,3% ao comparar a dose de 201,2 kg ha<sup>-1</sup> de N ao tratamento controle, e ele só não foi maior porque o solo na área do experimento possuía boa capacidade de suprimento de N, uma vez que no tratamento controle a produtividade média foi de 6.204 kg ha<sup>-1</sup>, maior que a média brasileira. Ferreira et al. (2001) ainda verificaram que a adubação nitrogenada proporcionou aumento do número de espigas por planta, fato que contribuiu para o aumento da produtividade.

Um exemplo do efeito que o N promove nos componentes de produção foi constatado por Oliveira e Caires (2003), que trabalhando com até  $120 \text{ kg ha}^{-1}$  de N, verificaram que a maior dose proporcionou, em relação ao tratamento controle, aumento de 23% na produção de milho, 6% no número de grãos por espiga, 42% na massa de espigas por planta, 25% na massa de grãos por espiga e 6% na massa de 1.000 grãos.

Araújo et al. (2004) avaliaram a resposta do milho à aplicação de 0 a  $240 \text{ kg ha}^{-1}$  de N e constataram, na maior dose, aumento de 27% de produtividade em relação ao tratamento controle, com produtividades respectivas de  $11,8 \text{ Mg ha}^{-1}$  e  $8,9 \text{ Mg ha}^{-1}$ . Também em relação ao controle, a produção de matéria seca das plantas aumentou em 37% com aplicação de  $240 \text{ kg ha}^{-1}$  de N. A quantidade máxima de N nos grãos foi obtida com  $120 \text{ kg ha}^{-1}$  de N, enquanto a maior quantidade de N na matéria seca da parte aérea foi obtida com  $240 \text{ kg ha}^{-1}$ , o que para os autores representou uma tendência de consumo de luxo.

Com o aumento das doses de N, Fernandes et al. (2005) obtiveram aumento no acúmulo de matéria seca no florescimento e na maturidade fisiológica, na massa de 100 grãos e na produtividade de grãos de seis cultivares de milho. Os maiores valores de produtividade de grãos e massa da matéria seca na maturação fisiológica foram  $6.042 \text{ kg ha}^{-1}$  e  $17,1 \text{ Mg ha}^{-1}$ , obtidos, respectivamente, com  $110$  e  $180 \text{ kg ha}^{-1}$  de N, o que representou aumento médio em relação ao do controle de 20 e de 8%, respectivamente. No entanto, as doses de N não promoveram alterações significativas no número de fileiras por espiga, número de grãos por fileira e comprimento da espiga.

Além dos incrementos nas características quantitativas, com a adubação nitrogenada também pode haver melhoria na qualidade dos grãos. Ferreira et al. (2001) constataram aumentos significativos nos teores de proteína nos grãos de milho à medida que aplicaram maiores doses de N, com variação de  $7,5 \text{ g kg}^{-1}$  a  $10,5 \text{ g kg}^{-1}$  no intervalo de doses de 0 a  $210 \text{ kg ha}^{-1}$  de N. A adubação nitrogenada também propiciou incrementos significativos nos teores de S (33,3 %); P (31,1%); K (22,2 %); Ca (12,5 %); Mg (28,4 %); Zn (30,6 %); Cu (144,5 %); Mn (66,4 %) e Fe (206,4 %) nos grãos. Por outro lado, Araújo et al. (2004) não obtiveram efeitos

significativos da adubação nitrogenada no teor de N nos grãos de milho com aplicação de até 240 kg ha<sup>-1</sup> de N.

Verifica-se melhoria tanto nas características qualitativas quanto nas quantitativas, à medida que se aumentam as doses de N, e para o fornecimento de todo N que a cultura de milho necessita durante seu ciclo, não há como abrir mão dos adubos sintéticos, porque o ritmo de crescimento e de absorção de N pelas plantas são muito altos. Apesar disso, por todos os benefícios que podem ser obtidos e pela necessidade de reciclagem de nutrientes em áreas agrícolas, o uso de todos os tipos de resíduos orgânicos, incluindo esterco, precisa ser estimulado. Com o uso dos adubos orgânicos tem-se, como meta imediata, aumentar o fornecimento de N e de outros nutrientes para as plantas. Como meta de longo prazo está o aumento do teor de matéria orgânica (MO) do solo e a melhoria de todos os demais atributos químicos e físicos do solo que a ela estão relacionados. Nas áreas cultivadas, a maior dificuldade no uso de resíduos é estimar o potencial de fornecimento de nutrientes a partir do processo de mineralização, porque o mesmo é dependente de fatores ambientais e da composição do resíduo.

## **2.6. Créditos de nitrogênio**

Devido às dificuldades na quantificação do fornecimento de N quando se utiliza adubo orgânico, são realizadas deduções pequenas e inconsistentes nas aplicações de fertilizantes nitrogenados sintéticos. Sendo assim, com o intuito de aprimorar as recomendações de adubação nitrogenada, foi desenvolvido um sistema que possibilita, de forma indireta, quantificar os créditos de N, sendo este denominado de método tradicional (Zebarth et al., 2008).

O termo crédito de nitrogênio é geralmente utilizado para quantificar o fornecimento de N quando se realiza o cultivo de um cereal em sucessão a uma leguminosa (Lory et al., 1995; Ding et al., 1997; Gentry et al., 2001). No entanto, esse conceito também pode ser empregado para determinar a quantidade de N que é fornecida pela aplicação de adubos orgânicos (Zebarth et al., 2008), que é mais conhecida como valor de substituição do nitrogênio (Ding et al., 1997).

O método tradicional de determinação dos créditos de N consiste em conduzir simultaneamente dois experimentos, um com uma fonte sintética e outro com um adubo orgânico (Lory et al., 1995). Obtém-se uma curva de resposta da cultura ao N no experimento com fertilizante sintético (produtividade x doses de N). Para calcular os créditos de nitrogênio utiliza-se a equação obtida no experimento com o fertilizante sintético e a produtividade obtida no experimento com adubo orgânico. Desta forma, substitui-se a produtividade obtida com determinada dose de esterco na equação gerada no experimento com ureia e resolve-se a equação pela incógnita x (doses de N, em  $\text{kg ha}^{-1}$ ). O valor obtido é o crédito de nitrogênio, que corresponde à quantidade de N que pode ser deduzida da adubação nitrogenada em função da aplicação da respectiva dose do adubo orgânico.

Entre as variáveis que afetam a mineralização dos resíduos orgânicos e consequentemente os créditos de nitrogênio em cada região, pode-se citar: tipo de resíduo, espécie animal, tipo do esterco, teor de N orgânico e mineral, época de aplicação, modo de aplicação, tipo de solo e condições climáticas (Zebarth et al., 2008). Como a mineralização dos compostos nitrogenados orgânicos não ocorre completamente no ano de aplicação, esterco de animais podem propiciar suprimento de N para as culturas além do ano de sua aplicação, e este fornecimento deve ser levado em consideração por razões agronômicas e também ambientais (Schröder et al., 2007; Schröder et al., 2013). Contudo, os créditos de N e os valores de substituição geralmente informados aos agricultores são baseados apenas na liberação desse nutriente durante o primeiro ano agrícola.

O fornecimento de N via adubos orgânicos não decorre apenas da mineralização do N-orgânico presente nestes insumos, mas também da fração mineral que está presente neste adubo, predominantemente na forma amoniacal, e que é disponibilizada prontamente para as plantas (Schröder et al., 2007). Ressalta-se que esta forma de N pode ser perdida facilmente por volatilização, na forma de amônia ( $\text{NH}_3$ ).

Análises laboratoriais dos materiais orgânicos podem ser usadas para estimar o potencial destes insumos como fornecedores de nutrientes. Todavia, a disponibilidade e o tempo de liberação do nutriente são difíceis de serem previstas devido às interações entre os insumos e o solo, e às variáveis ambientais e

biológicas. Apesar destas incertezas, o uso de adubos orgânicos resulta em diversas contribuições importantes para os programas de manejo sustentável dos nutrientes (Stark e Porter, 2005).

Stark e Porter (2005) ressaltam a importância de sincronizar a mineralização do N orgânico com o período de maior demanda das culturas para maximizar o aproveitamento do N, pois, quando grande parte do N é liberada precocemente pode haver impactos negativos na cultura, como desenvolvimento vegetativo excessivo, resultando na redução da produtividade, além de ocorrer perda deste nutriente com contaminação de corpos d'água. Por outro lado, a liberação tardia pode implicar na redução da produtividade, uma vez que ocorre déficit desse nutriente durante a fase de maior demanda da cultura.

Utilizando o método tradicional, Nicholson et al. (2003) verificaram créditos de N variando entre 33 e 265 kg ha<sup>-1</sup> para as culturas da beterraba açucareira e da batata, com aplicação de doses de cama de aves de até 42 Mg ha<sup>-1</sup>. Schröder et al. (2013) determinaram que para cada 100 kg de N aplicados com os adubos orgânicos houve aproveitamento de 31 a 72% no primeiro ano e de 37 a 104% no segundo, em comparação ao nitrato de amônio cálcico. Considerando a média dos dois anos, os maiores valores de substituição e, conseqüentemente os maiores créditos de N foram obtidos na seguinte sequência: 82% com esterco líquido de suíno, 79% com o esterco líquido de bovino leiteiro, 78% com concentrado mineral derivado da fração líquida do esterco líquido de suíno, 56% com a fração sólida separada do esterco líquido de bovino leiteiro. Os menores valores de substituição foram obtidos com o esterco bovino (34%), devido ao predomínio de N orgânico neste resíduo.

Paul e Beauchamp (1993) constataram que a quantidade total de N presente no esterco não é um bom índice para estimar o fornecimento de N para as culturas no ano da aplicação e consideraram que a porcentagem de N inorgânico no esterco é um indicador muito mais preciso para estimar a disponibilidade, embora possa ocorrer perda de parte significativa de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> e NO<sub>3</sub><sup>-</sup> após sua aplicação. Para Schröder et al. (2013) a relação entre os teores de N na forma amoniacal (mineral) e orgânica é o melhor índice para avaliar a disponibilidade imediata de N nos insumos, além de servir como base para avaliar a contribuição residual dessa fonte, sendo

que quanto menor for a relação, maior o efeito residual, uma vez que a proporção de N na forma orgânica será maior.

O valor de substituição de N para os esterco líquidos de bovinos obtidos por Schröder et al. (2007) para o primeiro ano de avaliação foi de 58%, o que indica que para cada 100 kg de N na forma de esterco há um crédito de N equivalente a 58 kg, e implica em igual redução de fertilizante sintético. Considerando o primeiro ano de avaliação do efeito residual, esse valor aumentou para 61%. O segundo e o terceiro anos de avaliação residual também propiciaram incrementos pequenos, sendo esses respectivamente de 2 e 4%. Os menores créditos de N foram obtidos com o esterco líquido de bovino leiteiro e com o esterco bovino, devido à aplicação na superfície e ao predomínio da forma orgânica nestes materiais. Segundo os autores, como nem todo N é mineralizado no ano de aplicação, haverá sempre mineralização nos anos subsequentes, fato que contribui para o aumento do crédito de N quando este insumo é aplicado sucessivamente.

Schröder et al. (2013) afirmam que em qualquer revisão sobre os valores de substituição de nitrogênio ou créditos de nitrogênio haverá grande variabilidade nos dados, o que é explicado pelas variações relacionadas ao ambiente, além de variações relacionadas à composição dos adubos orgânicos e à forma como são aplicados ao solo. Adicionalmente, eles citam que a fonte utilizada como fertilizante sintético também pode propiciar alterações na contabilização dos créditos, uma vez que há variações relacionadas à eficiência e dinâmica desses adubos no solo.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

Foram conduzidos simultaneamente dois experimentos em áreas adjacentes, sendo que em um o N foi fornecido tendo a ureia como fonte, e no outro, foi utilizado esterco bovino. Os experimentos foram conduzidos nos anos agrícolas 2011/2012, 2012/2013, 2013/2014 e 2014/2015. A aplicação de esterco bovino foi feita apenas nos dois primeiros anos agrícolas, e nos dois anos seguintes foi avaliado o efeito residual. O experimento com N-ureia foi conduzido para determinar a curva de resposta da cultura ao nitrogênio e, por meio do ajuste obtido entre doses e a produtividade, calcular os créditos de nitrogênio provenientes da adubação com esterco bovino e de seu efeito residual.

A pesquisa foi feita na Fazenda de Ensino, Pesquisa e Produção da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias - UNESP, Câmpus de Jaboticabal-SP, a 21°15'22" S, 48°15'58" O, e 583 m de altitude. O clima de Jaboticabal, segundo critérios estabelecidos por Köppen, é Aw (clima megatérmico), e as condições climáticas durante os períodos em que os experimentos foram conduzidos estão apresentadas nas Figuras 1 e 2.

O solo da área experimental foi classificado por Andrioli e Centurion (1999) como Latossolo Vermelho eutrófico muito argiloso. Previamente à instalação dos experimentos, foi realizada amostragem de solo na camada de 0-0,15 m para a avaliação dos atributos químicos, utilizando os métodos descritos por Raij et al. (2001), e os resultados foram: pH (CaCl<sub>2</sub>) 5,2; carbono orgânico (CO) = 12 g dm<sup>-3</sup>; P (resina) = 22 mg dm<sup>-3</sup>; K<sup>+</sup> = 2,4 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; Ca<sup>2+</sup> = 28 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; Mg<sup>2+</sup> = 18 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; H+Al = 31 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; CTC = 79 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> e V% = 61. Com base no valor de V%, não foi feita aplicação de calcário antecedendo a instalação dos experimentos.

A composição química do esterco bovino foi avaliada seguindo os métodos descritos por Alcarde (2009), e os resultados, expressos em base seca, foram: pH (CaCl<sub>2</sub>)= 7,0; MO-total = 310 g kg<sup>-1</sup>; C- total = 173 g kg<sup>-1</sup>; C-orgânico = 165 g kg<sup>-1</sup>; N total = 12,9 g kg<sup>-1</sup>; C/N = 13; Ca = 16 g kg<sup>-1</sup>; Mg = 3,9 g kg<sup>-1</sup>; S = 2,8 g kg<sup>-1</sup>; P = 4,1 g kg<sup>-1</sup>; K = 6,6 g kg<sup>-1</sup>; Na = 698 mg kg<sup>-1</sup>; Cu = 52 mg kg<sup>-1</sup>; Fe = 19.706 mg kg<sup>-1</sup>; Mn = 385 mg kg<sup>-1</sup>; Zn = 114 mg kg<sup>-1</sup>; B = 6 mg kg<sup>-1</sup>.

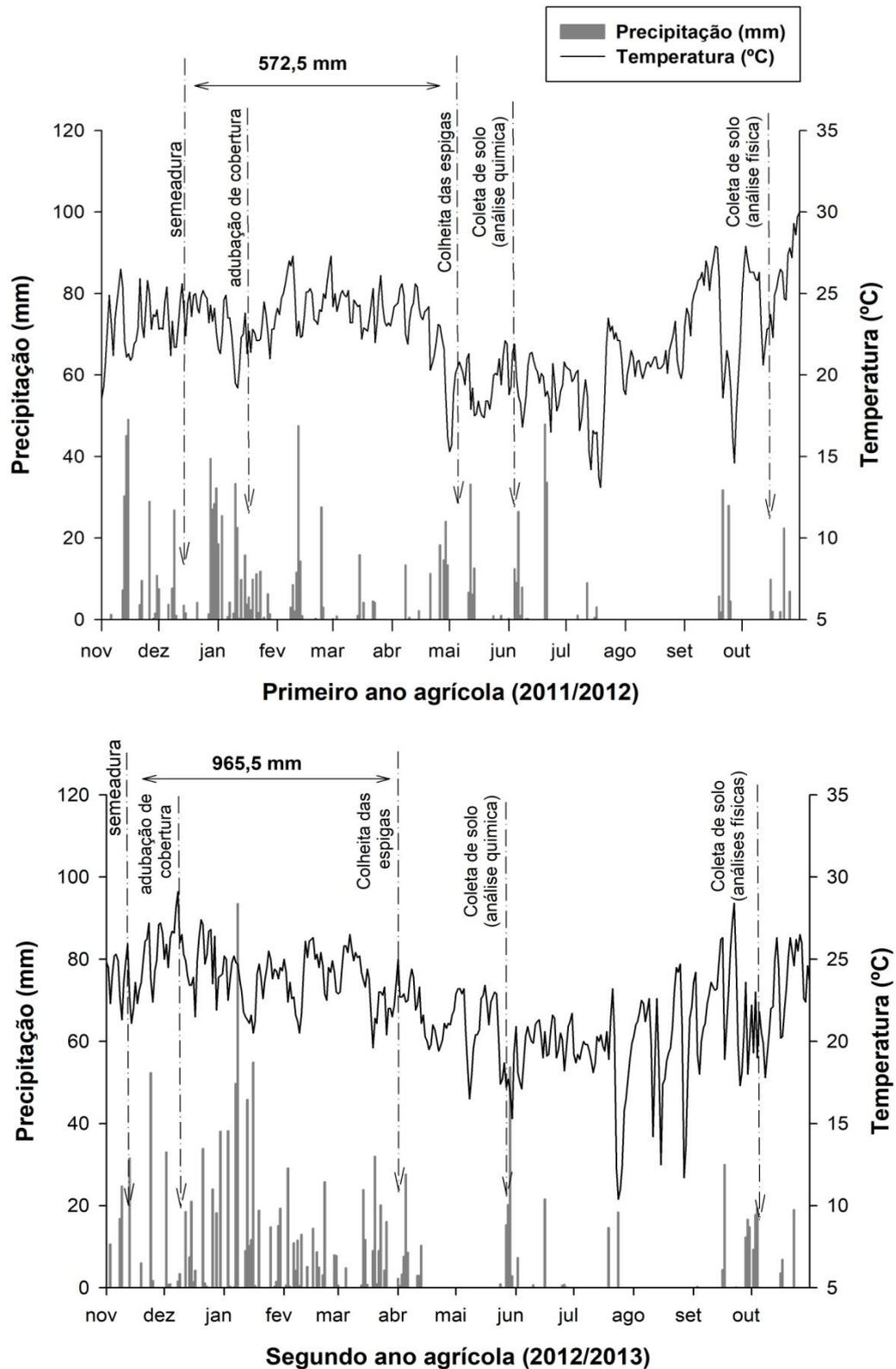


Figura 1. Precipitação pluvial e temperatura média no campo experimental durante os anos de aplicação de esterco bovino (2011/2012 e 2012/2013).

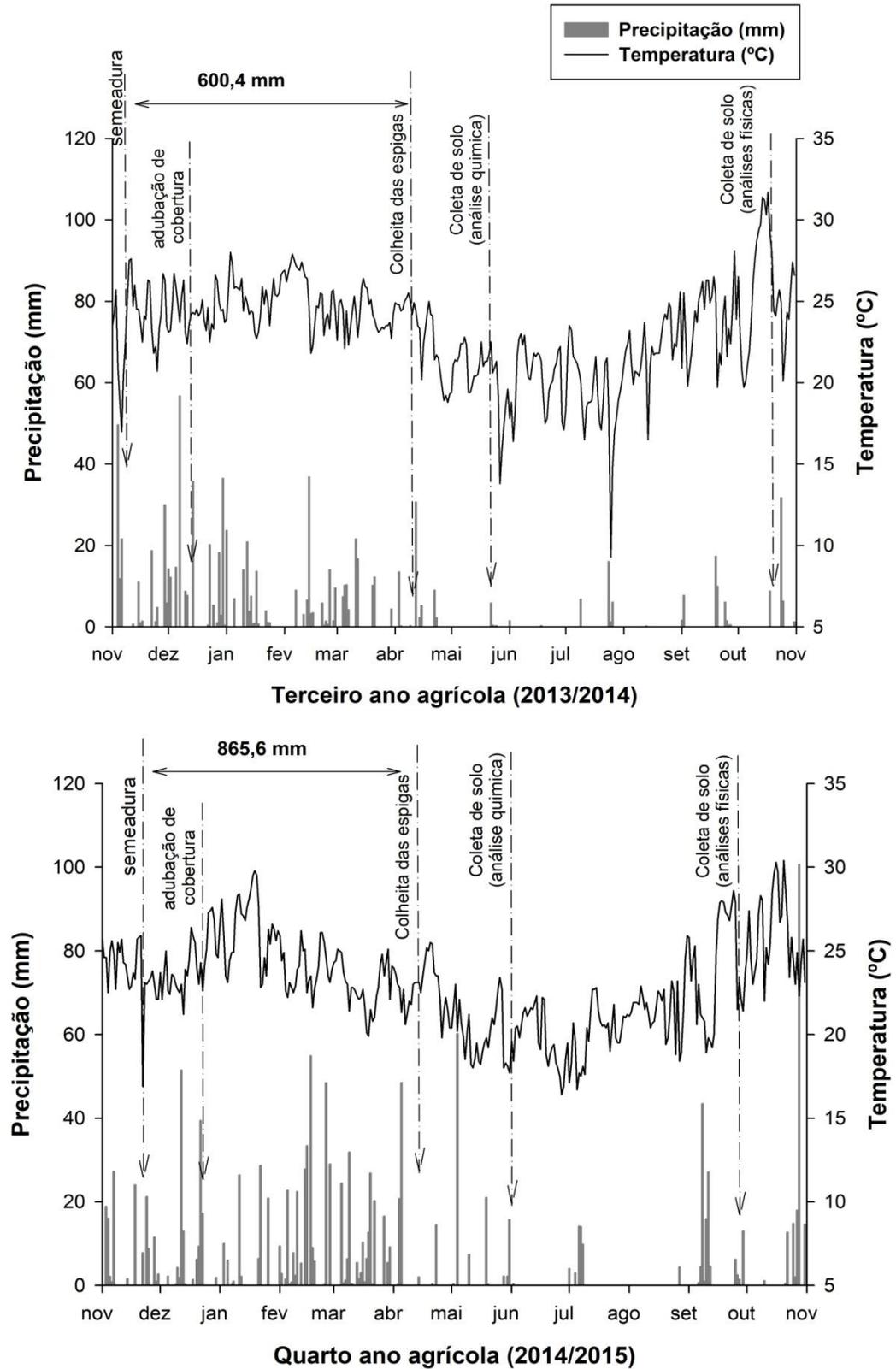


Figura 2. Precipitação pluvial e temperatura média no campo experimental durante os anos de avaliação do efeito residual do esterco (2013/2014 e 2014/2015).

No experimento com N-ureia, o delineamento experimental foi blocos casualizados, com seis tratamentos e quatro repetições, totalizando 24 parcelas. Cada parcela foi constituída por seis linhas de milho espaçadas entre si em 0,9 m e com 6 m de comprimento. A área total da parcela foi de 32,4 m<sup>2</sup>, e a área útil (21,6 m<sup>2</sup>) foi constituída pelas quatro linhas centrais da parcela. Os tratamentos foram compostos por seis doses de nitrogênio: 0, 60, 90, 120, 180 e 240 kg ha<sup>-1</sup>.

No experimento em que se utilizou o esterco bovino como fonte de N, o delineamento experimental foi blocos casualizados com sete tratamentos (doses) e quatro repetições, totalizando 28 parcelas. Cada parcela foi constituída por seis linhas de milho, espaçadas entre si em 0,9 m e com 9 m de comprimento. A área total da parcela foi de 48,6 m<sup>2</sup>, e a área útil foi de 32,4 m<sup>2</sup>, composta pelas quatro linhas centrais, excluídos 1m em cada uma das extremidades.

As doses de esterco bovino avaliadas foram: 0, 5, 10, 15, 30, 45 e 60 Mg ha<sup>-1</sup> em base seca, que forneceram respectivamente 0, 65, 129, 194, 387, 581 e 774 kg ha<sup>-1</sup> de N-total, aplicadas duas vezes seguidas, nos dois primeiros anos agrícolas, mantendo os tratamentos nas mesmas parcelas.

As aplicações do esterco foram realizadas em 12-12-2011 e 31-10-2012, no primeiro e no segundo anos agrícolas, respectivamente. A distribuição foi feita em área total, dividindo-se a parcela em quatro partes iguais para aumentar a precisão na distribuição. A incorporação do esterco bovino ao solo foi feita com grade aradora, no dia da aplicação, a aproximadamente 0,15 m de profundidade. Entre as parcelas foi mantida a distância de 1,5 m para evitar ou minimizar o efeito de carregamento de adubo de uma parcela para outra e entre blocos a distância foi de 2,7 m.

As datas de semeadura nos dois experimentos, em cada ano agrícola, foram 14-12-2011, 13-11-2012, 19-11-2013 e 18-11-2014, utilizando o híbrido Impacto Viptera. No experimento com N-ureia, a adubação de semeadura foi feita com 30 kg ha<sup>-1</sup> de N, 60 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 60 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O e 14,4 kg ha<sup>-1</sup> de S, com exceção do tratamento controle, no qual não foi aplicado nitrogênio. No experimento com esterco, as doses de P, K e S aplicadas na semeadura foram as mesmas utilizadas no experimento com N-ureia, mas neste caso não foi feita aplicação de ureia. As

doses de P e K foram determinadas em função da produtividade de grãos esperada ( $8-10 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) e dos teores destes nutrientes no solo (Raij e Cantarella, 1997).

A adubação de cobertura no experimento com N-ureia foi realizada quando a maior parte das plantas encontrava-se no estágio fenológico V-4. Com exceção das parcelas do tratamento controle, a quantidade de N aplicada foi a necessária para complementar a dose de N referente a cada tratamento, descontando-se os  $30 \text{ kg ha}^{-1}$  de N fornecidos na adubação de semeadura. A distribuição do adubo foi feita manualmente na superfície do solo, ao lado das linhas de plantas e a cerca de  $0,15 \text{ m}$  delas.

A coleta de folhas para diagnose do estado nutricional no experimento com esterco foi realizada na época do florescimento, sendo retirado o terço médio da folha da base da espiga principal, em 20 plantas por parcela, quando 50% das plantas já havia emitido o pendão, segundo o método descrito por Cantarella et al. (1997).

No experimento com esterco foram realizadas a avaliação da produção de matéria seca da parte aérea e a determinação do acúmulo de nitrogênio coletando cinco plantas por parcela, no estágio correspondente à maturidade fisiológica. O corte das plantas foi rente ao solo e, após pesagem, as amostras foram lavadas, moídas em triturador de forragens e secas em estufa de circulação forçada de ar a  $65 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$  até obter massa constante. Posteriormente, as amostras foram moídas para determinação da concentração de nitrogênio na parte aérea, seguindo os métodos descritos por Carmo et al. (2000). O acúmulo de nitrogênio foi calculado por meio da relação entre a concentração e a matéria seca da parte aérea, sendo os valores expressos em  $\text{kg ha}^{-1}$ .

Para a determinação da produtividade, em ambos os experimentos realizou-se a colheita das espigas da área útil das parcelas. As espigas foram despalhadas e debulhadas, e a massa de grãos foi obtida para cálculo da produtividade corrigida para 13% de umidade nos grãos. Entre a coleta das espigas de uma safra e a semeadura da próxima safra as áreas foram mantidas em pousio.

Na área do experimento com esterco bovino foram feitas avaliações de atributos químicos e físicos do solo. A amostragem para a avaliação dos atributos químicos foi feita após a colheita dos grãos (Figuras 1 e 2), coletando-se 12

amostras simples por parcela para obter a amostra composta. A coleta foi feita nas entrelinhas do milho, na camada de 0-0,15 m. As análises químicas de rotina foram realizadas seguindo os métodos descritos por Raij et al. (2001).

A coleta de solo para as análises físicas foi realizada o mais próximo possível do cultivo subsequente, para propiciar um período maior sem o revolvimento do solo e que pudesse refletir melhor a relação entre a adubação orgânica e as partículas do solo.

Na determinação do diâmetro médio ponderado dos agregados do solo foram coletadas três subamostras na camada de 0-0,15 m, com enxadão, para causar o mínimo de desestruturação, conforme Castro Filho et al. (1998). No laboratório, as amostras foram destorroadas manualmente, ainda úmidas e, na sequência, foram passadas em perneiras para obtenção de agregados com diâmetro entre 6,3 e 4,0 mm. Em seguida, os agregados foram secos ao ar e à sombra, para posteriormente serem submetidos às determinações das classes de agregados, empregando tamisamento úmido, segundo método de Yoder (1936). Com base na distribuição das classes de agregados foi calculado o diâmetro médio ponderado (DMP).

Para a determinação da porcentagem de macroporos, microporos, porosidade total e densidade do solo foram retiradas amostras de solo com estrutura preservada na camada de 0-0,10 m, utilizando anéis volumétricos de 5 cm de altura por 5 cm de diâmetro, em cinco pontos da área útil da parcela. A porosidade total, a microporosidade e a macroporosidade foram avaliadas segundo método de Claessen et al. (1997) e a densidade, de acordo com Blake e Hartge (1986).

Os dados obtidos nos dois experimentos foram submetidos à análise de variância e, quando significativos, foram submetidos à análise de regressão. A comparação de médias entre os anos, no experimento com esterco bovino, foi realizada com o teste de Tukey. Para tanto, utilizou-se o programa estatístico SISVAR 5.0 (Ferreira, 2003). O ajuste das relações obtidas entre as variáveis e as doses foi realizado por meio de modelos de regressão, sendo utilizado o programa Sigmaplot® 10.0, adotando-se a equação com maior coeficiente de determinação ( $R^2$ ).

Os créditos de nitrogênio provenientes da aplicação de esterco bovino e de seu efeito residual foram calculados empregando as equações de regressão ( $y =$

$ax^2+bx+c$ ) obtidas nos experimentos com N-ureia, sendo a produtividade de grãos ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) representada pela variável  $y$  e as doses de N ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) representadas pela variável  $x$ . Na sequência, substituiu-se, em  $y$ , na equação de regressão, a produtividade de grãos obtida com determinada dose de esterco e, resolvendo-a em função de  $x$ , encontrou-se o crédito de N, que é o valor que corresponde a quantidade de N que pode ser deduzida da adubação nitrogenada, utilizando a respectiva dose de esterco bovino (Lory et al., 1995).

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Efeitos da aplicação do esterco bovino em atributos químicos do solo

#### a) Carbono orgânico do solo – COS

Os teores de COS responderam significativamente às aplicações de esterco bovino, e alterações significativas também foram obtidas durante a avaliação do efeito residual nos dois anos subsequentes (Tabela 1). O aumento foi linear em todos os anos agrícolas (Figura 3).

Tabela 1. Efeito da aplicação anual do esterco bovino (anos agrícolas 2011/12 e 2012/13) e efeito residual da aplicação (anos agrícolas 2013/14 e 2014/15) nos teores de carbono orgânico do solo.

Esterco (Mg ha <sup>-1</sup> )	Carbono orgânico			
	2011/12	2012/13	2013/14	2014/15
	(g dm <sup>-3</sup> )			
0	12,5	13,7	13,4	15,7
5	12,6	14,6	14,0	18,1
10	12,5	14,6	14,7	17,8
15	13,0	15,0	15,9	17,4
30	13,9	16,3	15,4	19,1
45	15,8	19,4	16,6	18,8
60	16,1	20,1	17,2	19,1
<b>Média</b>	13,8 C	16,2 B	15,3 B	18,0 A
<b>p&gt; F</b>	0,002**	0,001**	0,001**	0,019*
<b>CV (%)</b>	6,0	9,9	5,8	7,2

\*, \*\* - Significativos a 5 e 1% de probabilidade, respectivamente pelo teste F.

Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, na linha, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

O acúmulo de COS está relacionado aos fatores edafoclimáticos que favorecem a sua mineralização em conjunto com a quantidade aplicada e a frequência de aplicação, conforme constatado por Sommerfeldt e Chang (1985) que obtiveram aumentos de 12,23 g kg<sup>-1</sup> nos teores de COS quando compararam aplicação de 60 Mg ha<sup>-1</sup> de esterco bovino com o tratamento controle, após onze anos de aplicações sucessivas. Verifica-se que as respostas obtidas por

Sommerfeldt e Chang (1985) foram maiores do que as obtidas no presente experimento, o que está relacionado ao maior suprimento de C ao longo dos anos no experimento desses autores, e o tempo, onze anos de aplicação. Ainda, as diferenças climáticas entre as regiões podem explicar parte das diferenças, uma vez que o experimento de Sommerfeldt e Chang (1985) foi realizado em Lethbridge (Canadá), local de maior latitude, com temperatura média de 18,1 °C no verão e precipitação média anual de 405 mm, fato que implica em menor atividade dos microrganismos do solo em comparação com a região de Jaboticabal, onde a temperatura média anual é de 22° C e precipitação média é de 1.552 mm, fato que propicia maior atividade dos microrganismos. Outro fator que estimula a atividade dos microrganismos e acelera o processo de decomposição da MO, reduzindo os teores de COS e pode justificar as diferenças, é o revolvimento do solo, prática ainda muito realizada na agricultura brasileira, e que foi usada no presente experimento. Salienta-se então a importância da introdução de resíduos orgânicos ao solo em áreas sob esses sistemas, pois, conforme demonstrado neste trabalho, mesmo sob condições oxidantes no solo, a adição de esterco bovino propiciou aumentos nos teores de COS durante os anos de aplicação e garantiu sua permanência em níveis maiores do que os encontrados na instalação do experimento até o segundo ano após a suspensão da adubação.

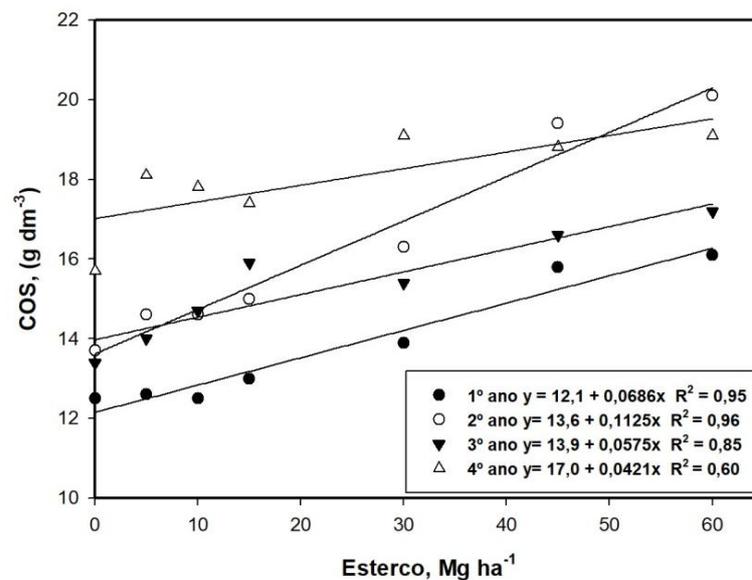


Figura 3. Teores de carbono orgânico no solo (COS) em função de doses de esterco bovino e de seu efeito residual.

No presente experimento, os aumentos percentuais, com base na Figura 3, comparando o tratamento controle com a dose de 60 Mg ha<sup>-1</sup>, foram de 34, 49, 24 e 15% respectivamente, do primeiro ao quarto ano. No segundo ano agrícola, além do efeito da adição de esterco bovino, houve também contribuição do efeito residual da aplicação do ano anterior, o que propiciou os maiores aumentos nos teores de COS. Adicionalmente, no segundo ano e nos anos subsequentes, houve a incorporação dos resíduos da cultura do milho do ano anterior, em quantidade que aumentou de forma proporcional às doses de esterco.

Os teores de C observados no quarto ano agrícola (Tabela 1), maiores do que nos anos anteriores, podem estar relacionados ao manejo dos restos culturais do milho com o desintegrador mecânico alguns dias após a colheita das espigas, sendo esses fragmentados em pequenas partículas, o que contribuiu para o aumento do COS na camada superficial nesse período. Esse manejo dos restos culturais não havia sido adotado nos anos anteriores.

Os resultados de COS do quarto ano dificultam a quantificação do efeito residual do esterco. De qualquer modo, no terceiro ano ele ficou bem definido (Tabela 1) e há expectativa de que ele tenha persistido além do quarto ano. A duração do efeito residual de um resíduo orgânico, como o esterco bovino, depende de fatores climáticos, biológicos e edáficos, além dos fatores inerentes à composição da fonte utilizada, sendo que a presença de materiais mais recalcitrantes, como os compostos orgânicos de maior complexidade e peso molecular, contribuem para maior permanência destes no solo (Zimmer, 2002). Ainda, pode-se citar que a incorporação do COS dentro de agregados pode contribuir para a manutenção deste no solo por maior período, o que pode restringir o acesso dos microrganismos a estes compostos orgânicos (Tisdall e Oades, 1982).

#### **b) Capacidade de troca catiônica**

Houve efeito das doses de esterco na CTC, sendo que esta variável aumentou à medida que se aplicou doses maiores (Tabela 2). Esta resposta também foi observada durante a avaliação do efeito residual. O ajuste obtido em todos os anos foi o linear, sendo que na maior dose de esterco, a CTC foi maior do que a

observada no controle em 23, 21, 19 e 18%, respectivamente no primeiro, segundo, terceiro e quarto anos agrícolas (Figura 4). Por outro lado, não há justificativa para as diferenças obtidas entre os anos, especialmente porque elas ocorreram inclusive no tratamento controle, no qual a única fonte de material orgânico foram os restos culturais de milho, incorporados ao fim de cada ciclo.

Tabela 2. Efeito da aplicação anual do esterco bovino (anos agrícolas 2011/12 e 2012/13) e efeito residual da aplicação (anos agrícolas 2013/14 e 2014/15) na CTC do solo.

Esterco (Mg ha <sup>-1</sup> )	CTC			
	2011/12	2012/13	2013/14	2014/15
	(mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )			
0,0	68,6	76,4	84,8	86,2
5,0	68,5	79,7	85,0	94,5
10,0	74,7	81,6	86,3	95,3
15,0	70,6	83,1	89,9	98,7
30,0	75,8	86,1	91,7	98,9
45,0	81,6	90,1	95,9	103,2
60,0	82,8	94,3	101,2	106,7
<b>Média</b>	74,7	84,5	90,7	97,6
<b>p&gt; F</b>	0,001**	0,005**	0,043*	0,001**
<b>CV (%)</b>	5,3	6,83	8,71	5,23

\* e \*\* - Significativo a 5 e 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

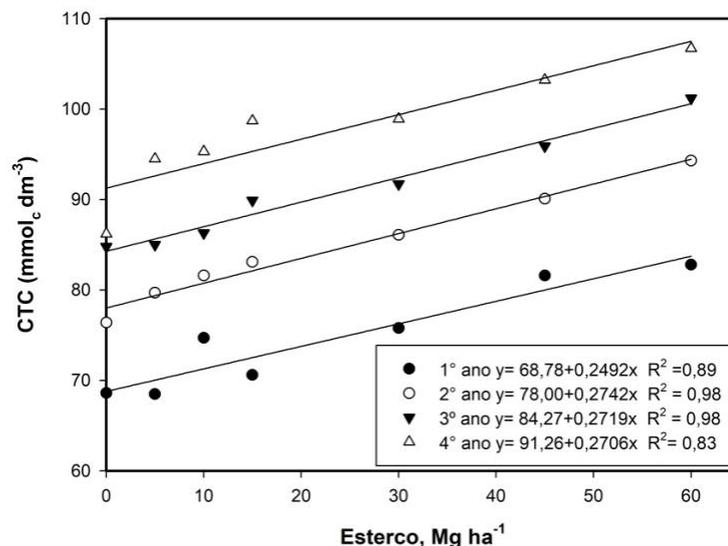


Figura 4. Capacidade de troca catiônica do solo (CTC) em função de doses de esterco bovino e de seu efeito residual.

O aumento na CTC à medida que se aumentou as doses de esterco pode estar relacionado aos aumentos obtidos nos teores de COS (Figura 3), componente que apresenta elevada quantidade de grupos funcionais (carboxílicos, fenólicos, quinonas, semiquinonas, aldeído, álcool, amina, ester e éter), baixo ponto de carga zero e elevada superfície específica (Bayer e Mielniczuk, 2008), o que resulta em maior número de cargas negativas e maior capacidade de armazenamento de cátions no solo do que os argilominerais de grade 1:1 e os óxidos, componentes principais de solos muito intemperizados como o Latossolo (Castro et al., 2014). Verifica-se, dessa forma, que mesmo aumentos pouco expressivos nos teores de COS no solo, contribuem significativamente no aumento da CTC, o que reforça a importância da utilização de técnicas que propiciem aumento ou manutenção do COS, pois esse componente contribui com até 80% da CTC dos solos de regiões tropicais.

### **c) acidez do solo**

A adição de esterco bovino ao solo causou aumento no valor de pH e diminuição na acidez potencial (H+Al) nos dois primeiros anos agrícolas (Tabela 3). Nos anos subsequentes, período no qual foi feita avaliação do efeito residual do esterco, não foram constatadas alterações significativas nos valores de pH e de (H+Al).

Nos dois primeiros anos, o aumento no valor de pH do solo com o aumento das doses de esterco bovino foi linear (Figura 5). Embora existam na literatura vários trabalhos em que há aumento do pH em função da aplicação de resíduos orgânicos, não há consenso sobre o mecanismo responsável (Eghball, 1999; Tang et al., 1999; Haynes e Mokolobate, 2001; Naramabuye e Haynes, 2006), sendo isso possivelmente relacionado à grande variabilidade na composição desses insumos.

Observa-se que a acidez potencial decresceu à medida que se aplicou maiores doses de esterco bovino (Figura 5), sendo o mínimo obtido com a dose de 45 Mg ha<sup>-1</sup> no primeiro ano e de 43 Mg ha<sup>-1</sup> no segundo ano, representando uma redução de 18 e 21 % respectivamente, em relação ao obtido no controle em seus

respectivos anos. Verifica-se também que a adição de esterco bovino em quantidades maiores do que esta promoveu um ligeiro aumento nesta variável.

Tabela 3. Efeito da aplicação anual do esterco bovino (anos agrícolas 2011/12 e 2012/13) e efeito residual da aplicação (anos agrícolas 2013/14 e 2014/15) no valor de pH CaCl<sub>2</sub> e na acidez potencial (H+Al) do solo.

<b>Esterco (Mg ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>2011/12</b>	<b>2012/13</b>	<b>2013/14</b>	<b>2014/15</b>
<b>pH (CaCl<sub>2</sub>)</b>				
0	5,3	5,7	5,4	5,3
5	5,6	5,8	5,5	5,4
10	5,5	5,9	5,4	5,4
15	5,6	5,9	5,5	5,5
30	5,6	5,9	5,7	5,5
45	5,8	6,0	5,6	5,5
60	5,8	6,1	5,7	5,6
<b>Média</b>	5,6 B	5,9 A	5,5 C	5,5 D
<b>p&gt; F</b>	0,001**	0,001**	0,060 <sup>ns</sup>	0,063 <sup>ns</sup>
<b>CV (%)</b>	2,6	2,6	2,6	2,5
<b>H+Al (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>)</b>				
0	27,0	28,8	32,3	31,3
5	23,5	25,0	27,5	30,3
10	23,0	24,3	28,8	31,0
15	22,2	24,3	28,0	29,5
30	22,2	23,5	25,5	28,8
45	21,8	21,8	26,8	28,8
60	21,0	22,8	26,5	27,3
<b>Média</b>	23,0 C	24,4 C	27,9 B	29,6 A
<b>p&gt; F</b>	0,001**	0,020*	0,053 <sup>ns</sup>	0,441 <sup>ns</sup>
<b>CV (%)</b>	5,8	9,8	9,7	9,5

\*, \*\* e <sup>ns</sup> - Significativos a 5 e 1% de probabilidade e não significativo, respectivamente pelo teste F;

Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, na linha, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

As alterações constatadas no pH do solo no primeiro ano agrícola variaram entre 5,3 e 5,8, respectivamente, para o tratamento controle e a maior dose (60 Mg ha<sup>-1</sup>), enquanto no segundo ano agrícola estas alterações foram respectivamente de 5,6 e 6,1, proporcionando incrementos de 9% em ambos os anos (Figura 5). O

aumento no pH e diminuição na H+Al com a aplicação de esterco bovino, podem ser justificados pela descarboxilação dos ácidos orgânicos, que ocorre durante a decomposição inicial do esterco, processo em que há formação de substâncias fenólicas e também de substâncias húmicas. Com a formação de ânions orgânicos a partir destas substâncias, pode ocorrer consumo de prótons ( $H^+$ ) e aumento do valor de pH do solo (Naramabuye e Haynes, 2006).

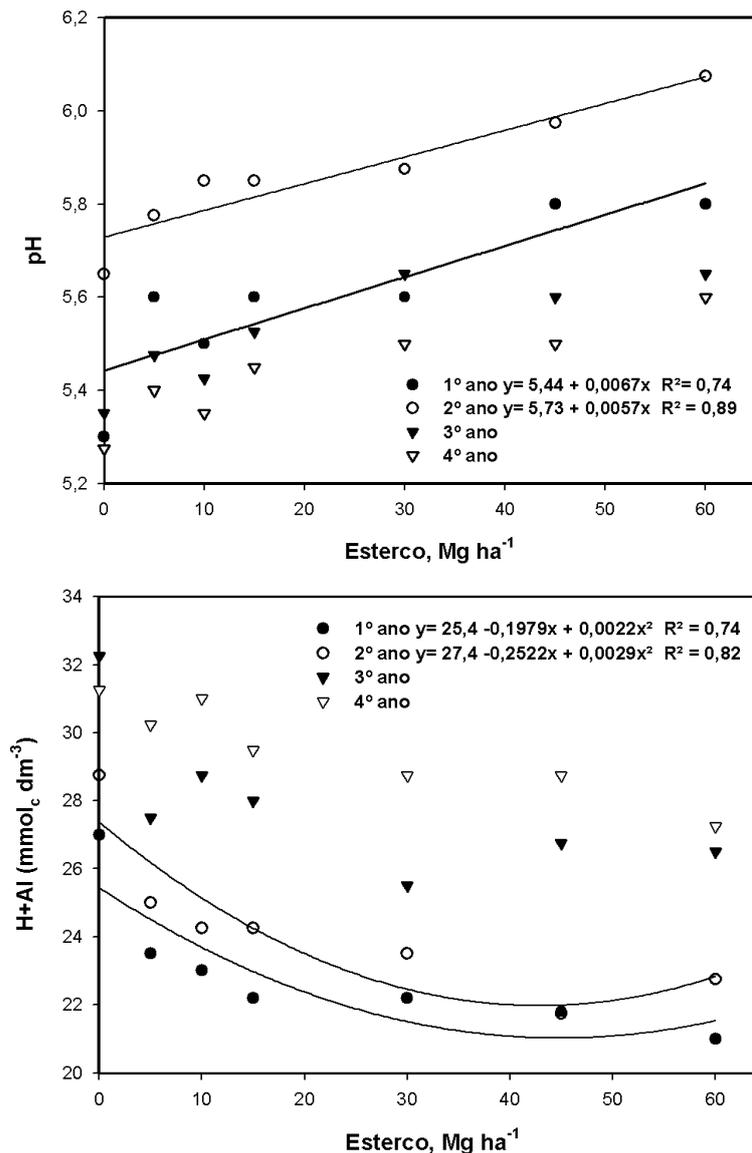


Figura 5. Valores de pH  $CaCl_2$  e de acidez potencial (H+AL) do solo em função de doses de esterco bovino e de seu efeito residual.

Além dos efeitos já mencionados, o aumento do pH com a aplicação do esterco pode ser devido à presença de carbonatos no esterco, uma vez que o calcário é usado na dieta dos animais como fonte de cálcio, e não é totalmente metabolizado. A presença de carbonatos no esterco pode ser considerada uma vez que o C-total foi maior do que o C-orgânico no produto utilizado. Havendo carbonatos do esterco, o aumento do valor de pH vai ocorrer por causa da reação do ânion com íons  $H^+$  da solução do solo, resultando na formação de água e gás carbônico (Eghball, 1999; Naramabuye e Haynes, 2006). À medida que os íons  $H^+$  da solução do solo são consumidos na reação, íons  $H^+$  de reserva, componentes do  $H+Al$ , são liberados dos coloides orgânicos e inorgânicos da fase sólida e também são consumidos por ânions carbonato na solução, mecanismo que faz a acidez potencial diminuir.

Ao comparar os anos, verifica-se que o maior valor de pH foi obtido no segundo ano agrícola, seguido pelo primeiro, terceiro e quarto anos agrícolas. Os maiores valores de pH obtidos no segundo ano agrícola são decorrentes das aplicações sucessivas de esterco bovino, o que implicou em maior consumo de  $H^+$  (Naramabuye e Haynes, 2006). Na  $H+Al$  a resposta foi inversa, com o maior valor constatado no quarto ano agrícola, seguida pelo terceiro, segundo e primeiro anos agrícolas (Tabela 3). Com base nessas respostas verifica-se que os efeitos do esterco bovino no pH do solo e na  $H+Al$  são de curta duração e que é necessário aporte constante de material orgânico ou aplicação de quantidades maiores para maior persistência dos efeitos nesse atributo.

#### **d) Bases trocáveis**

Os teores de Ca no solo foram alterados significativamente pela aplicação de esterco bovino, fato que também ocorreu nos anos de avaliação do efeito residual (Tabela 4).

Verifica-se, em todos os anos agrícolas, que os teores de cálcio no solo aumentaram linearmente em função das doses de esterco, e que esta resposta permaneceu durante a avaliação do efeito residual nos dois últimos anos. Ao comparar os teores de Ca no solo no tratamento que recebeu a maior dose de esterco com os obtidos no controle, têm-se aumentos de 42; 47; 42 e 35%,

respectivamente no primeiro, segundo, terceiro e quarto anos agrícolas, com os maiores incrementos no segundo ano, o que está relacionado à sobreposição das doses (Figura 6).

Tabela 4. Efeito da aplicação anual do esterco bovino (anos agrícolas 2011/12 e 2012/13) e efeito residual da aplicação de esterco bovino (anos agrícolas 2013/14 e 2014/15) nos teores de  $\text{Ca}^{2+}$  do solo.

Esterco ( $\text{Mg ha}^{-1}$ )	$\text{Ca}^{2+}$			
	2011/12	2012/13	2013/14	2014/15
	( $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ )			
0	21,8	27,3	28,5	32,8
5	27,0	33,5	32,0	39,0
10	24,5	33,0	31,5	38,8
15	25,0	32,3	34,0	42,3
30	27,8	37,0	37,3	40,0
45	31,8	40,8	38,5	45,5
60	32,8	43,3	42,5	48,8
<b>Média</b>	27,2 C	35,3 B	34,9 B	41,0 A
<b>p &gt; F</b>	0,001**	0,007**	0,022*	0,001**
<b>CV (%)</b>	11,5	10,2	15,1	8,7

\*, \*\* - Significativos a 5 e 1% de probabilidade, respectivamente pelo teste F;

Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, na linha, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

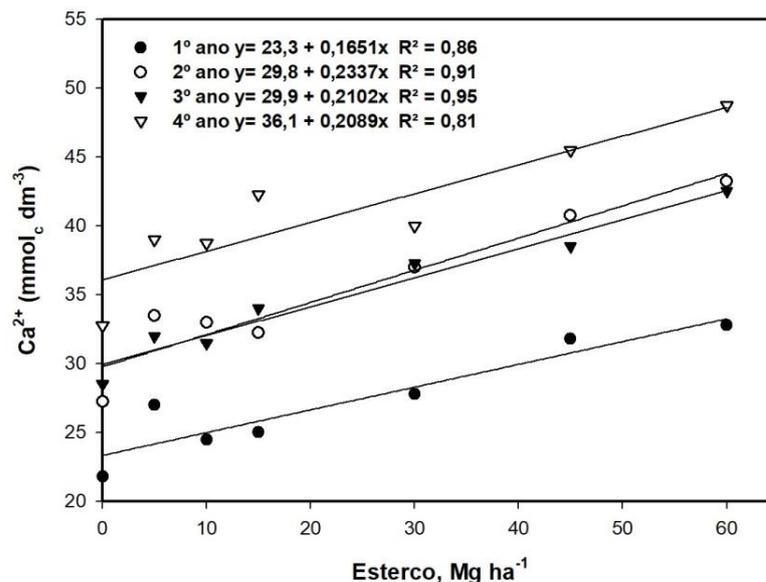


Figura 6. Teores de  $\text{Ca}^{2+}$  trocável no solo em função de doses de esterco bovino e de seu efeito residual.

O menor teor médio de  $\text{Ca}^{2+}$  no solo foi obtido no primeiro ano agrícola (Tabela 4), enquanto que os maiores teores de  $\text{Ca}^{2+}$  no solo foram obtidos no quarto ano agrícola. Justificam-se esses maiores teores no quarto ano agrícola pelo acúmulo proporcionado pelas aplicações sucessivas de esterco bovino e da reciclagem desse nutriente via incorporação dos restos culturais, sendo que a exportação de Ca via grãos foi baixa (dados não apresentados). Ainda nesse período, foram obtidos os menores acúmulos desse nutriente na parte aérea, contribuindo para a manutenção de maiores teores de  $\text{Ca}^{2+}$  no solo (dados não apresentados).

Os teores de  $\text{Mg}^{2+}$  no solo apresentaram respostas significativas à adição de esterco bovino apenas no primeiro ano agrícola, e durante a avaliação do efeito residual desse insumo, foram obtidas alterações significativas no quarto ano agrícola (Tabela 5). Verificam-se, em ambas as épocas, ajuste linear entre os teores desse cátion e as doses de esterco bovino (Figura 7). Atribui-se o aumento nos teores desse nutriente no solo diretamente ao fornecimento de Mg via esterco, pois a cada  $1 \text{ Mg ha}^{-1}$  de esterco foram adicionados  $3,9 \text{ kg}$  de Mg.

Tabela 5. Efeito da aplicação anual do esterco bovino (anos agrícolas 2011/12 e 2012/13) e efeito residual da aplicação (anos agrícolas 2013/14 e 2014/15) nos teores de  $\text{Mg}^{2+}$  do solo.

Esterco ( $\text{Mg ha}^{-1}$ )	$\text{Mg}^{2+}$			
	2011/12	2012/13	2013/14	2014/15
	( $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ )			
0	16,8	17,3	20,3	16,8
5	21,0	20,0	20,3	20,0
10	17,5	19,0	20,5	20,0
15	19,8	18,0	22,3	21,3
30	21,0	19,5	23,0	21,5
45	22,5	21,0	24,5	23,5
60	22,8	21,5	25,8	24,8
<b>Média</b>	20,2 B	19,5 B	22,4 A	21,1 AB
<b>p&gt; F</b>	0,006**	0,253 <sup>ns</sup>	0,243 <sup>ns</sup>	0,001**
<b>CV (%)</b>	9,8	13,1	16,2	8,4

\*\* e <sup>ns</sup> - Significativos a 1% de probabilidade e não significativo, respectivamente pelo teste F;

Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, na linha, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Os menores teores de  $Mg^{2+}$  no solo durante o primeiro e segundo anos agrícolas em relação aos anos posteriores podem estar relacionados à forma com que este nutriente ocorre no esterco bovino, sendo que pouco mais de 55% do Mg presente neste insumo está na forma prontamente disponível às plantas (Eghball, 2002). Sendo assim, o aumento dos teores de  $Mg^{2+}$  no terceiro ano agrícola pode ser justificado pela mineralização de Mg que estava na forma orgânica, processo que foi favorecido pelos sucessivos preparos do solo e pelas condições climáticas favoráveis (Figuras 1 e 2). Adicionalmente, podem-se relacionar os maiores teores de  $Mg^{2+}$  obtidos nessa safra com sua reciclagem ao longo dos ciclos, inclusive de  $Mg^{2+}$  absorvido em camadas mais profundas e depositado na superfície do solo pelos restos culturais, visto que não houve aplicação deste nutriente ao solo após o segundo ano agrícola.

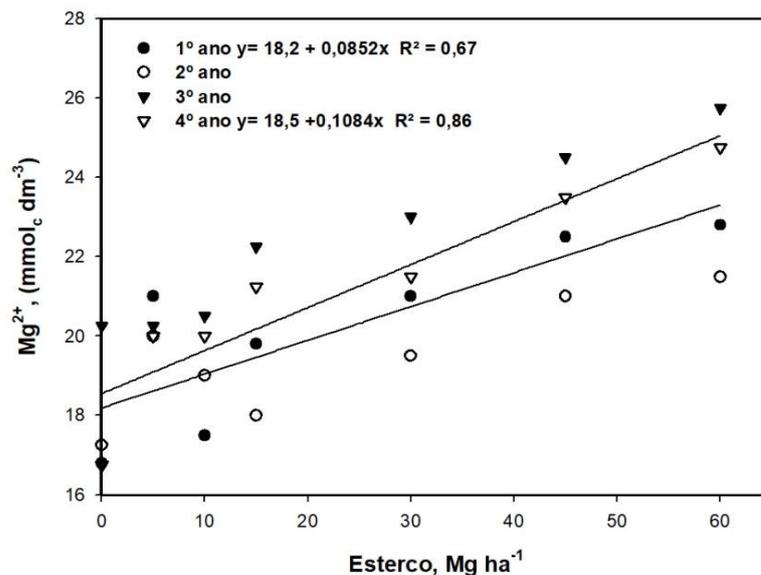


Figura 7. Teores de Mg no solo em função de doses de esterco bovino e de seu efeito residual.

A adição de esterco bovino ao solo promoveu alterações nos teores de  $K^+$  nos dois primeiros anos agrícolas, e alterações significativas também foram observadas no primeiro ano de avaliação do efeito residual do esterco (Tabela 6). Os teores de  $K^+$  no solo aumentaram linearmente em função das doses de esterco bovino apenas no primeiro ano, propiciando aumento de 123% em relação ao tratamento controle.

Nos dois anos agrícolas subsequentes, os ajustes obtidos foram quadráticos, com aumento até a dose de 50 Mg ha<sup>-1</sup> de esterco bovino, dose na qual os teores de K<sup>+</sup> no solo representaram incrementos de 89 e 51% em relação aos teores obtidos no controle em cada ano (Figura 8). Os aumentos estão diretamente associados à aplicação via esterco, uma vez que foram adicionados 8 kg de K<sub>2</sub>O para cada 1 Mg de esterco.

Tabela 6. Efeito da aplicação anual do esterco bovino (anos agrícolas 2011/12 e 2012/13) e efeito residual da aplicação (anos agrícolas 2013/14 e 2014/15) nos teores de K<sup>+</sup> do solo.

Esterco (Mg ha <sup>-1</sup> )	K <sup>+</sup>			
	2011/12	2012/13	2013/14	2014/15
	(mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )			
0	2,8	3,1	3,8	5,4
5	3,1	4,6	5,2	5,2
10	3,5	5,3	5,5	5,5
15	3,6	5,2	5,7	5,7
30	4,8	6,1	6,0	5,6
45	5,6	6,6	6,1	5,5
60	6,2	6,8	6,4	6,0
<b>Média</b>	4,2 B	5,4 A	5,5 A	5,6 A
<b>p &gt; F</b>	0,002**	0,001**	0,001**	0,181 <sup>ns</sup>
<b>CV (%)</b>	14,5	14,8	9,7	6,4

\*\* e <sup>ns</sup> - Significativos a 1% de probabilidade e não significativo, respectivamente pelo teste F;

Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, na linha, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

A resposta linear dos teores de K às doses de esterco observada apenas no primeiro ano pode ser relacionada ao fato das cargas do solo neste ano estarem menos saturadas por íons de maior valência como o Ca e o Mg, que apresentam preferência na ligação com as cargas do solo. A preferência dos cátions pelas cargas do solo obedece à seguinte ordem Al<sup>3+</sup>>Ca<sup>2+</sup>>Mg<sup>2+</sup>>K<sup>+</sup> (Oliveira et al., 2002). Sendo assim, as diminuições observadas nos teores de K no segundo e terceiro ano, com doses de esterco maiores do que 50 Mg ha<sup>-1</sup>, podem ser decorrentes da saturação das cargas do solo com os íons Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup> na camada superficial (0-0,15 m). Em função da preferência de adsorção dos cátions de maior valência, íons

monovalentes, como o  $K^+$ , também apresentam maior mobilidade no perfil (Ernani et al., 2007), com deslocamento para camadas mais profundas do que os 0,15 m superficiais, camada na qual foi feita a amostragem.

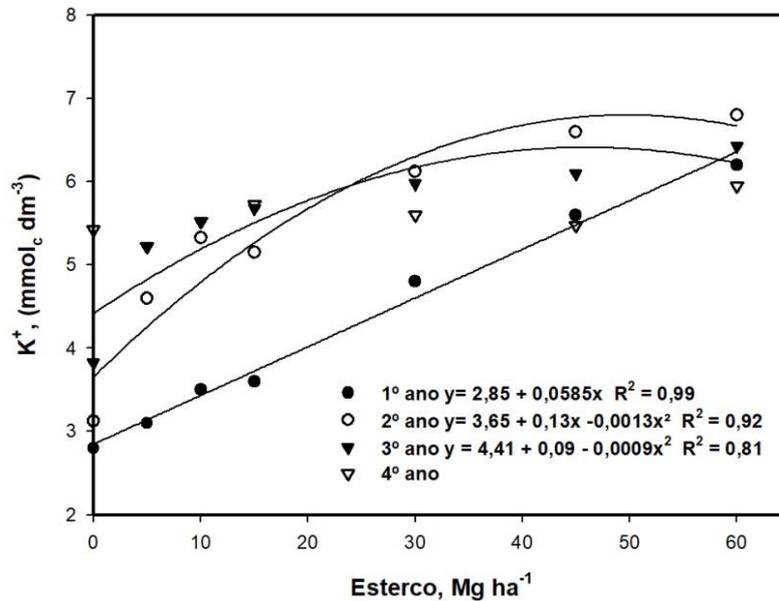


Figura 8. Teores de K no solo em função de doses de esterco bovino e de seu efeito residual.

O menor teor de  $K^+$  foi obtido no primeiro ano agrícola (Tabela 6) e está relacionado ao menor aporte desse nutriente no solo, sendo que a partir do segundo ano agrícola houve nova aplicação de esterco, o que propiciou maiores teores desse nutriente no solo e a sua persistência em teores mais elevados do que os observados no primeiro ano agrícola.

#### e) Saturação por bases

Com a aplicação de esterco houve aumento no V% nos dois anos agrícolas, e o efeito dessas alterações também foi observada durante a avaliação do efeito residual (Tabela 7). Em todos os anos o ajuste obtido foi linear, sendo observados incrementos de 18, 17, 17 e 14% ao comparar os valores obtidos na maior dose com os obtidos no tratamento controle (Figura 9).

Tabela 7. Efeito da aplicação anual do esterco bovino (anos agrícolas 2011/12 e 2012/13) e efeito residual da aplicação (anos agrícolas 2013/14 e 2014/15) na saturação por bases.

Esterco (Mg ha <sup>-1</sup> )	V%			
	2011/12	2012/13	2013/14	2014/15
0	59,9	62,2	59,3	62,6
5	68,5	69,2	67,6	67,8
10	66,3	70,1	66,6	67,2
15	68,4	69,4	68,7	70,02
30	70,5	72,3	72,2	69,8
45	73,2	75,8	72,1	71,8
60	74,6	75,8	73,7	74,4
<b>Média</b>	68,8	70,7	68,6	69,0
<b>p &gt; F</b>	0,010*	0,001**	0,017*	0,008*
<b>CV (%)</b>	7,06	5,15	7,56	5,28

\*\* , \* e <sup>ns</sup> - Significativos a 5% e 1% de probabilidade e não significativo, respectivamente pelo teste F.

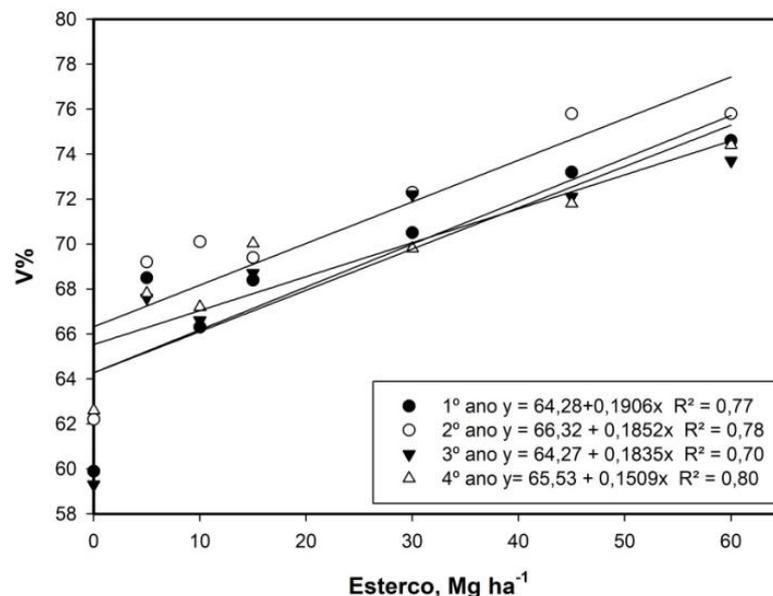


Figura 9. Saturação por bases (V%) no solo em função de doses de esterco bovino e de seu efeito residual.

Os aumentos observados nessa variável estão diretamente relacionados ao fornecimento dos nutrientes Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> e K<sup>+</sup>, visto que a cada 1 Mg aplicado de esterco bovino foram adicionados respectivamente 16; 3,9 e 6,6 kg ha<sup>-1</sup> desses nutrientes. Com isso, justificam-se os maiores incrementos observados nos teores de Ca<sup>2+</sup> no solo e o predomínio desse cátion no complexo de troca, pois além de ter

sido adicionado em maior quantidade, também é o nutriente que apresenta maior preferência de ligação com as cargas do solo em relação aos outros macronutrientes catiônicos (Oliveira et al., 2002). Além do aumento de bases, houve consumo de  $H^+$ , como já comentado.

A manutenção do V% em níveis elevados mesmo no período de avaliação do efeito residual pode ser relacionada à mineralização de  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$  ao longo dos novos ciclos de cultivo e à baixa exportação desses nutrientes da área via grãos (Fornasieri Filho, 2008). Quanto ao  $K^+$ , embora seja o segundo nutriente mais exportado pela cultura, houve reposição anual na adubação de semeadura, o que permitiu a manutenção dos teores no solo e a manutenção do V% nestes níveis.

#### f) P disponível

As aplicações de esterco bovino nos dois primeiros anos proporcionaram aumentos lineares nos teores de P à medida que se aumentou as doses de esterco, e também propiciaram a persistência desses efeitos durante os dois anos de avaliação do efeito residual (Tabela 8, Figura 10).

Tabela 8. Efeito da aplicação anual do esterco bovino (anos agrícolas 2011/12 e 2012/13) e efeito residual da aplicação (anos agrícolas 2013/14 e 2014/15) nos teores de P do solo.

Esterco (Mg ha <sup>-1</sup> )	P			
	2011/12	2012/13	2013/14	2014/15
	(mg dm <sup>-3</sup> )			
0	24,2	22,0	18,3	26,8
5	31,2	35,3	35,8	43,8
10	31,2	39,5	36,0	37,0
15	35,2	48,0	40,8	38,3
30	47,2	58,5	57,0	41,8
45	62,0	81,0	61,0	60,8
60	73,5	121,5	75,8	68,5
<b>Média</b>	43,5 B	58,0 A	46,4 B	45,3 B
<b>p &gt; F</b>	0,004**	0,003**	0,001**	0,001**
<b>CV (%)</b>	24,0	22,8	16,9	23,0

\*\* - Significativos a 1% de probabilidade pelo teste F;

Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, na linha, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

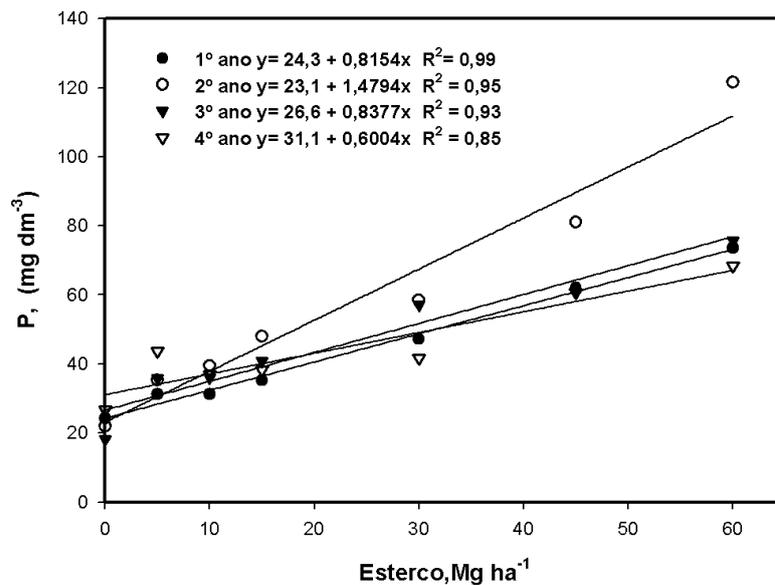


Figura 10. Teores de P no solo em função de doses de esterco bovino e de seu efeito residual.

Verifica-se, respectivamente do primeiro ao quarto ano, com base nas equações de regressão, que os teores de P no solo obtidos no tratamento controle e com 60 Mg ha<sup>-1</sup> de esterco foram de 24 e 73 mg dm<sup>-3</sup>; 23 e 112 mg dm<sup>-3</sup>; 26 e 77 mg dm<sup>-3</sup>; e 31 e 67 mg dm<sup>-3</sup>, que representam incrementos de 204; 382; 196 e 116%, com destaque para o segundo ano agrícola, no qual foram obtidos os maiores incrementos (Figura 10).

Os maiores teores de P no solo obtidos no segundo ano (Tabela 8) são decorrentes das aplicações sucessivas de esterco, que continha 9,4 kg Mg<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, de modo que foram adicionados na maior dose de esterco, 563 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, o que é cerca de 9 vezes a dose recomendada para a cultura, com base na análise de solo inicial. Respostas semelhantes às obtidas no presente trabalho foram relatadas por Eghball e Power (1999), que verificaram aumento linear nos teores de P no solo à medida que aumentaram as doses de esterco. No entanto, a magnitude das respostas encontradas por esses autores foi maior, e com quatro anos de aplicação de esterco, o aumento foi de 33 mg kg<sup>-1</sup> de P para cada 100 kg de P adicionado. Eghball e Power (1999) verificaram que na maior dose, o total adicionado de P no solo foi de 600 kg ha<sup>-1</sup>, e o teor desse nutriente no solo correspondente a esse tratamento foi de 231 mg kg<sup>-1</sup>. Destaca-se, no entanto, que os maiores incrementos

obtidos por esses autores em relação aos apresentados nesse trabalho são consequência das maiores quantidades adicionadas de P, maior período de aplicação e aos maiores teores iniciais deste nutriente no solo em que eles conduziram o experimento.

Com base nos teores obtidos na maior dose, no segundo ano, e considerando a camada do solo de 0 – 0,15 m, estima-se 168 kg ha<sup>-1</sup> de P, quantidade que corresponde a 1.026 kg de mono-amônio fosfato (MAP), e pode representar economia de R\$ 1.542,75, considerando os valores médios de janeiro de 2017 (CEPEA, 2017). Ao utilizar janeiro de 2016 como referência, que foi o último ano agrícola do experimento, o valor economizado seria ainda maior, haja vista que o custo de 1 Mg do adubo fosfatado estava maior do que o de 2017 em 35% (CEPEA, 2017). Desta forma, ressalta-se a importância do esterco como fornecedor de outros nutrientes além do nitrogênio.

A partir do terceiro ano agrícola, verifica-se diminuição nos teores de P em relação ao segundo ano, principalmente nos tratamentos com doses acima de 30 Mg ha<sup>-1</sup>, o que pode ser atribuído à exportação desse nutriente via grãos e à não aplicação de esterco a partir desse ano, sendo a adubação de semeadura a única entrada desse nutriente. Além disso, no esterco predominam formas de P inorgânico (Eghball et al., 2002; Darch et al., 2014) que vão se transformando de P lábil em P não lábil, formas que não são extraídas com resina trocadora de ânions (Braos et al., 2015). Ainda, parte do P orgânico do esterco que vai se transformando em P inorgânico na mineralização, passa de lábil a não lábil, resultando em menor disponibilidade de P com o tempo (Darilek et al., 2010; Braos et al., 2015).

## **4.2. Efeitos da aplicação do esterco bovino nos atributos físicos do solo**

### **a) Diâmetro médio ponderado dos agregados (DMP)**

Com a aplicação de esterco bovino ao solo houve aumento no DMP dos agregados do solo nos dois primeiros anos agrícolas, e também nos dois anos subsequentes, de avaliação do efeito residual (Tabela 9). O modelo matemático de melhor ajuste entre doses de esterco e DMP foi o linear no primeiro e terceiro anos agrícolas, enquanto que nos outros, foi o quadrático (Figura 11).

Tabela 9. Efeito da aplicação anual do esterco bovino (anos agrícolas 2011/12 e 2012/13) e efeito residual da aplicação (anos agrícolas 2013/14 e 2014/15) no diâmetro médio ponderado dos agregados do solo.

Esterco (Mg ha <sup>-1</sup> )	DMP dos agregados do solo			
	2011/12	2012/13	2013/14	2014/15
	(mm)			
0	2,6	2,6	2,4	2,2
5	2,6	3,1	2,9	2,3
10	2,8	3,3	2,5	2,8
15	2,8	3,4	2,5	3,0
30	3,3	3,6	3,0	2,9
45	3,4	3,8	3,1	2,6
60	3,7	3,8	3,1	3,0
<b>Média</b>	3,0 B	3,4 A	2,8 C	2,7 C
<b>p&gt; F</b>	0,002**	0,0031**	0,001**	0,012*
<b>CV (%)</b>	7,8	8,6	11,5	9,7

\*\* e \* - Significativo a 5 e 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F; Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, na linha, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

No primeiro e no terceiro anos agrícolas, os maiores valores de DMP dos agregados do solo, obtidos com aplicação de 60 Mg ha<sup>-1</sup>, foram 43 e 25% maiores do que os obtidos no tratamento controle, respectivamente. No segundo e quarto anos agrícolas, devido ao ajuste quadrático, verifica-se aumento nesta variável com aplicação de até 44 e 41 Mg ha<sup>-1</sup> de esterco bovino, doses nas quais os aumentos foram de 39 e 29% em relação ao tratamento controle (Figura 11).

O aumento observado no DMP dos agregados à medida que se aumentou as doses de esterco pode estar relacionado ao aumento nos teores de COS e à função que este componente exerce, pois atua como agente cimentante propiciando a união entre as partículas (Yagüe et al., 2016). A obtenção de incrementos na estabilidade de agregados pelo aumento de carbono no solo é fundamental para a melhoria de sua qualidade, sendo que resulta em maior proteção contra a erosão promovida pela água, além de aumentar a infiltração de água no solo devido ao aumento na porosidade, o que irá propiciar menor escoamento superficial (Yagüe et al., 2016). Verifica-se, deste modo, a importância na manutenção e/ou aumento do COS, pois ele é um dos principais agentes de ligação que proporciona estabilidade aos

agregados do solo, enquanto os agregados propiciam proteção para a MO e agem como importante reservatório de carbono e também de nutrientes (Tisdall e Oades, 1982). A partir da agregação, indiretamente, são afetadas as demais características físicas do solo como densidade, porosidade, aeração, capacidade de retenção e infiltração de água (Haynes e Swift, 1990; Bayer e Mielniczuk, 2008).

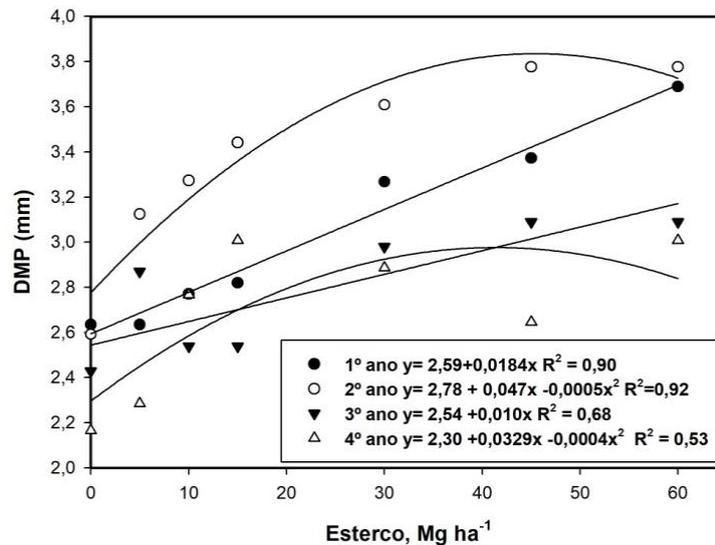


Figura 11. Diâmetro médio ponderado dos agregados do solo em função de doses de esterco bovino e de seu efeito residual.

A maior média e os maiores incrementos no DMP dos agregados do solo neste trabalho ocorreram no segundo ano agrícola (Tabela 9), devido ao maior aumento nos teores de COS (Tabela 1), resultado da sobreposição das doses de esterco. Os menores valores DMP dos agregados do solo foram obtidos nos dois últimos anos agrícolas, período no qual ocorre diminuição na magnitude dos efeitos. Esta diminuição dos efeitos pode ser explicada pelo preparo do solo que foi feito ao final de cada ciclo de cultivo, o que pode ter ocasionado o rompimento dos agregados maiores e a formação de agregados com menor DMP, e também pelo favorecimento da mineralização do COS, que atua como aglutinante das partículas do solo.

Embora o solo da área do experimento tenha grande quantidade de agentes cimentantes inorgânicos, como os óxidos de Fe e de Al, os aumentos no DMP dos agregados do solo podem ser associados às adições de carbono orgânico, uma vez

que a partir do terceiro ano agrícola, início da avaliação do efeito residual do esterco, os valores de DMP dos agregados do solo começaram a diminuir, assim como os teores de COS. A formação dos macroagregados pode estar mais relacionada ao efeito biológico, e sua estabilidade depende do suprimento constante de resíduos vegetais com o intuito de repor os compostos orgânicos transitórios, como os polissacarídeos de origem microbiana, e também os temporários, como as hifas de fungos e as raízes finas (Jastrow e Miller, 1998). Tanto a formação quanto a manutenção dos macroagregados são favorecidas por aporte de carbono orgânico no sistema (Six et al., 2002), o que justifica os resultados de DMP apresentados neste trabalho.

As respostas nesse atributo com a adição de adubo orgânico são variáveis e em muitos casos os resultados obtidos não são relacionados aos incrementos no COS, mas ao  $\text{Ca}^{2+}$ , pois o  $\text{Ca}^{2+}$  pode formar pontes que ligam os polímeros da matéria orgânica com a superfície dos colóides do solo, principalmente quando o pH está acima de 5,4, condição na qual há predomínio desses cátions, propiciando aumento da agregação (Corrêa et al., 2009). Considerando que os teores de  $\text{Ca}^{2+}$  no solo aumentaram com as doses de esterco (Tabela 4), a agregação obtida na área do experimento pode estar associada aos dois fatores: aumento de MO e de  $\text{Ca}^{2+}$ . Sendo assim, destaca-se que tão importante quanto a quantidade dos resíduos aplicada é a qualidade destes, e que em casos de resíduos de qualidade inferior, é necessária a aplicação de doses altas, como as aplicadas no presente trabalho, a fim de obter incrementos nos atributos físicos do solo.

## **b) Porosidade do solo**

A microporosidade do solo não foi alterada significativamente pela adição de esterco bovino e também pelo efeito residual (Tabela 10), embora tenham sido verificados aumentos significativos nos teores de COS em todos os anos do experimento. Atribui-se a ausência de efeitos da adubação orgânica na microporosidade à composição mineralógica do solo utilizado, que apresenta elevada concentração de óxidos de Fe e de Al na fração argila, que atuam como agentes cimentantes e, desta forma, podem ter influenciado nas baixas respostas aos aumentos de COS (Tisdall e Oades, 1982). Esses resultados estão de acordo

com a afirmação de Jastrow e Miller (1998), de que ocorrem poucas alterações nos microagregados em decorrência do uso e manejo do solo, devido à estabilidade dos agentes orgânicos e inorgânicos envolvidos na formação desses, sendo essas variações mais relacionadas ao tipo de solo.

Ao comparar a microporosidade entre os anos, verifica-se aumento à medida que se realizam novos cultivos, e o maior valor foi obtido no quarto ano agrícola (Tabela 10). Essa resposta pode ser explicada pelos sucessivos preparos do solo, que podem ter favorecido a diminuição nos teores de COS e na macroporosidade, com compactação do solo, o que pode ser evidenciado pela redução no DMP no período de avaliação do efeito residual.

As respostas às doses de esterco na macroporosidade do solo foram significativas nos dois primeiros anos agrícolas e também durante o primeiro ano de avaliação do efeito residual (Tabela 10). O ajuste obtido entre doses e a macroporosidade nos três anos foi o linear, com aumento nessa variável à medida que se aumentaram as doses de esterco bovino (Figura 12). No primeiro ano agrícola, obteve-se, na maior dose de esterco, aumento de 29% na macroporosidade em relação ao tratamento controle, enquanto que os incrementos observados para esse atributo no segundo e terceiro anos agrícolas foram respectivamente de 28 e 20 %.

Os maiores incrementos no volume de macroporos e os maiores valores ocorreram no primeiro e no segundo anos agrícolas, o que está relacionado ao maior aporte de carbono orgânico. Na sequência, têm-se os maiores valores de macroporosidade no terceiro ano agrícola e, por último, o quarto ano agrícola.

Relacionam-se os aumentos na macroporosidade, à medida que se aplicou maiores doses de esterco, ao aumento na quantidade de carbono orgânico, o que possibilitou o agrupamento de agregados menores, resultando na formação de agregados e poros maiores. A formação dos macroagregados pode estar mais relacionada ao efeito biológico, e sua estabilidade depende do suprimento constante de resíduos vegetais com o intuito de repor os compostos orgânicos transitórios como os polissacarídeos de origem microbiana e também os temporários, como as hifas de fungos e as raízes finas (Jastrow e Miller, 1998).

Tabela 10. Efeito da aplicação anual do esterco bovino (anos agrícolas 2011/12 e 2012/13) e efeito residual da aplicação (anos agrícolas 2013/14 e 2014/15) na microporosidade, macroporosidade e porosidade total do solo.

<b>Esterco (Mg ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>2011/12</b>	<b>2012/13</b>	<b>2013/14</b>	<b>2014/15</b>
<b>Microporosidade (m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>)</b>				
0	0,390	0,403	0,390	0,394
5	0,381	0,379	0,380	0,399
10	0,369	0,381	0,379	0,396
15	0,363	0,379	0,377	0,39
30	0,360	0,379	0,379	0,386
45	0,337	0,380	0,369	0,402
60	0,368	0,364	0,365	0,399
<b>Média</b>	0,367 C	0,381 B	0,377 BC	0,395 A
<b>p&gt; F</b>	0,064 <sup>ns</sup>	0,083 <sup>ns</sup>	0,111 <sup>ns</sup>	0,403 <sup>ns</sup>
<b>Cv (%)</b>	9,0	11,5	9,1	10,7
<b>Macroporosidade (m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>)</b>				
0	0,152	0,155	0,148	0,156
5	0,172	0,177	0,160	0,132
10	0,185	0,191	0,163	0,148
15	0,197	0,205	0,158	0,162
30	0,182	0,192	0,162	0,157
45	0,199	0,197	0,167	0,134
60	0,220	0,225	0,190	0,140
<b>Média</b>	0,187 A	0,192 A	0,164 B	0,147 C
<b>p&gt; F</b>	0,014*	0,017*	0,045*	0,490 <sup>ns</sup>
<b>Cv (%)</b>	12,0	10,0	10,4	16,5
<b>Porosidade Total (PT) (m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>)</b>				
0	0,543	0,558	0,538	0,550
5	0,553	0,556	0,540	0,531
10	0,554	0,572	0,542	0,543
15	0,56	0,584	0,535	0,551
30	0,542	0,571	0,541	0,543
45	0,567	0,577	0,536	0,536
60	0,588	0,588	0,555	0,539
<b>Média</b>	0,558 B	0,572 A	0,541 C	0,542 C
<b>p&gt; F</b>	0,191 <sup>ns</sup>	0,137 <sup>ns</sup>	0,453 <sup>ns</sup>	0,526 <sup>ns</sup>
<b>Cv (%)</b>	9,6	10,5	9,1	13,4

\* e <sup>ns</sup> - Significativo a 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente, pelo teste F;

Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, na linha, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

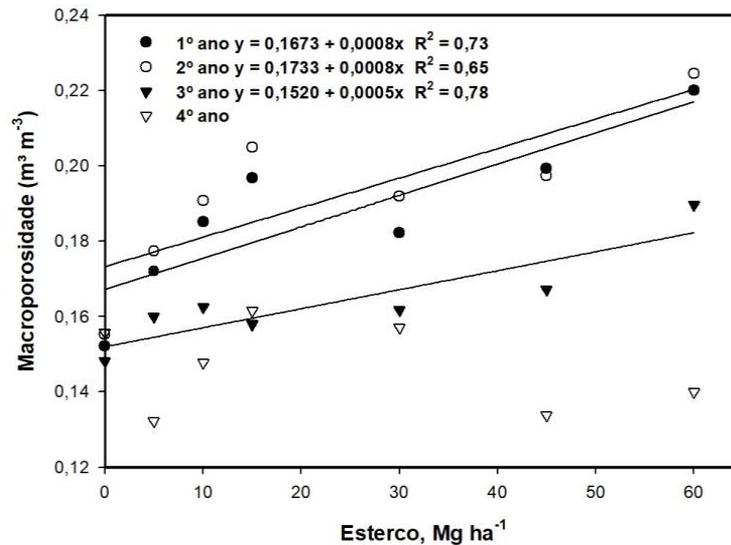


Figura 12. Macroporosidade do solo em função de doses de esterco bovino e de seu efeito residual.

Nota-se que os teores de COS não explicam totalmente os resultados obtidos, sendo que os maiores teores deste obtido no terceiro ano agrícola em comparação com os obtidos no primeiro ano agrícola, não refletiram da mesma forma na porcentagem de macroporos. Assim, parte da resposta pode ser explicada pelo manejo empregado, sendo que os sucessivos preparos de solo podem ter ocasionado fragmentação dos agregados e, além disso, ter favorecido a compactação do solo. Ainda pode-se inferir que a falta de aporte de esterco a partir do terceiro ano também influenciou na agregação, não havendo a formação de agregados e poros maiores na mesma magnitude observada nos anos anteriores. Com base no exposto, justifica-se também a ausência de respostas significativas no quarto ano agrícola.

Assim como a microporosidade, dentro de cada ano, a porosidade total (PT) também não foi alterada significativamente pela adição de esterco bovino e nem pelo seu efeito residual (Tabela 10), embora tenham sido constatadas alterações significativas na macroporosidade nos três primeiros anos agrícolas. A ausência de resposta da PT às doses de esterco deve-se às respostas obtidas na micro e macroporosidade, sendo que a primeira apresentou decréscimo com o aumento das doses, embora não significativo, enquanto a macroporosidade aumentou, o que implicou em menores alterações na PT, que é obtido por soma dos dois atributos.

Houve maior PT no segundo ano agrícola, seguido do primeiro ano agrícola, e com os menores valores nessa variável durante a avaliação do efeito residual (Tabela 10). A maior PT obtida no segundo ano agrícola está relacionada aos maiores aumentos na macroporosidade neste período, resultantes dos aumentos nos teores de COS. A diminuição na PT a partir do terceiro ano agrícola pode ser relacionada ao menor aporte de material orgânico e aos sucessivos preparos do solo, que propiciaram redução na macroporosidade do solo em maior magnitude do que os aumentos observados na microporosidade.

### **c) Densidade do solo**

A densidade do solo diminuiu com a aplicação de esterco nos dois primeiros anos agrícolas e também durante o primeiro ano de avaliação do efeito residual (Tabela 11). Verifica-se ajuste quadrático entre doses de esterco e densidade no primeiro ano agrícola, sendo o menor valor obtido com a dose de  $36 \text{ Mg ha}^{-1}$ , dose que propiciou diminuição de 8% nesse atributo ao comparar com o tratamento controle. Nos dois anos seguintes o ajuste que melhor representou as respostas foi o linear, com os valores de densidade decrescendo à medida que se aplicaram maiores doses de esterco bovino, sendo o valor observado na maior dose, inferior ao obtido no controle em 5%, nos dois anos agrícolas (Figura 13).

A diminuição na densidade do solo (Tabela 11) com o aumento das doses de esterco bovino está relacionada aos incrementos na macroporosidade, no DMP, e ao efeito de diluição dos materiais de menor densidade presentes no esterco quando misturados aos de maior densidade já presentes no solo, resultando desta forma em menor massa para um mesmo volume de solo (Haynes e Naidu, 1998). Diminuições neste atributo com a aplicação de esterco bovino também foram obtidas nos experimentos realizados por Sommerfeldt e Chang (1985) e por Miller et al. (2002), que trabalharam com doses entre 0 e  $90 \text{ Mg ha}^{-1}$  de esterco bovino. Sommerfeldt e Chang (1985) constataram no tratamento controle valor de densidade equivalente a  $0,96 \text{ Mg m}^{-3}$ , enquanto o valor obtido na maior dose foi de  $0,78 \text{ Mg m}^{-3}$ . No experimento realizado por Miller et al. (2002) o valor de densidade no tratamento controle foi de  $1,21 \text{ Mg m}^{-3}$ , enquanto que na maior dose o valor obtido nesse atributo foi de  $0,71 \text{ Mg m}^{-3}$ . As diminuições maiores em relação às obtidas no

presente trabalho estão relacionadas às maiores doses empregadas e ao maior número de aplicações realizadas por esses autores. Ainda podem ser citadas as condições climáticas, uma vez que em Jaboticabal elas são mais favoráveis a mineralização da matéria orgânica, o que implica na necessidade de uma quantidade maior de resíduos ou de um período maior de aplicação para atingir resultados semelhantes aos obtidos em condições de clima temperado.

Tabela 11. Efeito da aplicação anual do esterco bovino (anos agrícolas 2011/12 e 2012/13) e efeito residual da aplicação (anos agrícolas 2013/14 e 2014/15) na densidade do solo.

Esterco (Mg ha <sup>-1</sup> )	Densidade			
	2011/12	2012/13	2013/14	2014/15
	(g cm <sup>-3</sup> )			
0	1,28	1,30	1,29	1,26
5	1,29	1,24	1,24	1,30
10	1,20	1,24	1,26	1,27
15	1,17	1,21	1,23	1,25
30	1,19	1,25	1,26	1,25
45	1,22	1,26	1,21	1,29
60	1,20	1,27	1,19	1,28
<b>Média</b>	1,22 B	1,25 B	1,24 B	1,27 A
<b>p &gt; F</b>	0,001**	0,001**	0,001**	0,607 <sup>ns</sup>
<b>CV (%)</b>	7,5	6,7	9	6,4

\*\* e <sup>ns</sup> - Significativo a 1% de probabilidade e não significativo, respectivamente, pelo teste F;

Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, na linha, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

O maior valor de densidade foi obtido no quarto ano agrícola (Tabela 11) e está relacionado ao menor aporte de material orgânico e também aos sucessivos preparos do solo que foram realizados ao fim de cada safra e que podem alterar a estrutura e, por consequência, o arranjo e o volume dos poros (Tormena et al., 1998), conforme observado nas reduções na macroporosidade e também no DMP dos agregados do solo, nesta última safra. Em todos os anos e em todos os tratamentos, os valores de densidade (Figura 13) ficaram abaixo do limite estabelecido como crítico para o desenvolvimento das plantas, ou seja, 1,30 g cm<sup>-3</sup> em solos com textura muito argilosa (Reichert et al., 2003).

Contudo, mesmo pequenas alterações como as obtidas no presente experimento são importantes para propiciar melhorias na qualidade do solo, principalmente sob cultivo convencional. Desta forma, recomenda-se o uso de materiais orgânicos por períodos maiores do que os praticados nesse trabalho, pois ficou evidenciado que o suprimento contínuo desses insumos por mais de um ano propicia melhorias nos atributos físicos do solo.

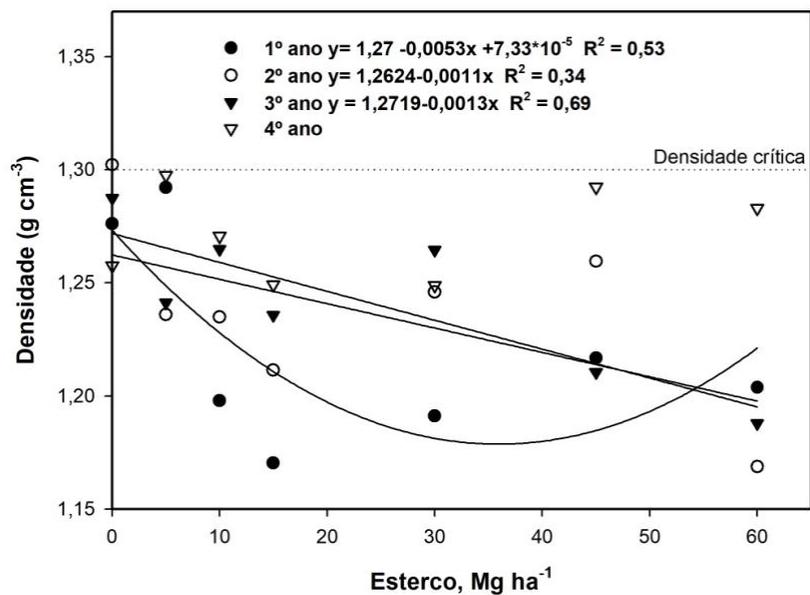


Figura 13. Densidade do solo em função de doses de esterco bovino e de seu efeito residual.

#### 4.3. Teores de nitrogênio em função de doses de esterco bovino na folha usada para diagnose nutricional do milho

Não houve efeito significativo das doses de esterco nos teores de N nas folhas de milho nas duas primeiras safras. Porém, mesmo com grandes diminuições verificaram-se alterações significativas nos teores de N nas folhas no terceiro e quarto anos agrícolas, nos quais se avaliou o efeito residual da aplicação do esterco, sendo constatados, em ambos os anos, efeitos lineares e positivos (Tabela 12, Figura 14).

Tabela 12. Efeito da aplicação anual do esterco bovino (anos agrícolas 2011/12 e 2012/13) e efeito residual da aplicação (anos agrícolas 2013/14 e 2014/15) nos teores de N na folha diagnose do milho.

Esterco (Mg ha <sup>-1</sup> )	N			
	2011/12	2012/13	2013/14	2014/15
	(g kg <sup>-1</sup> )			
0	29,2	28,8	18,0	13,0
5	31,6	31,0	18,8	17,4
10	31,8	31,0	20,7	17,7
15	31,5	31,8	20,1	16,9
30	30,8	30,8	20,3	17,9
45	30,5	30,0	23,1	22,1
60	31,4	31,3	24,6	22,9
<b>Média</b>	31,0 A	30,7 A	20,8 B	18,3 C
<b>p &gt; F</b>	0,320 <sup>ns</sup>	0,416 <sup>ns</sup>	0,001 <sup>**</sup>	0,001 <sup>**</sup>
<b>CV (%)</b>	3,4	6,2	9,1	10,5

\*\* e <sup>ns</sup> - Significativos a 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente, pelo teste F;

Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, na linha, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

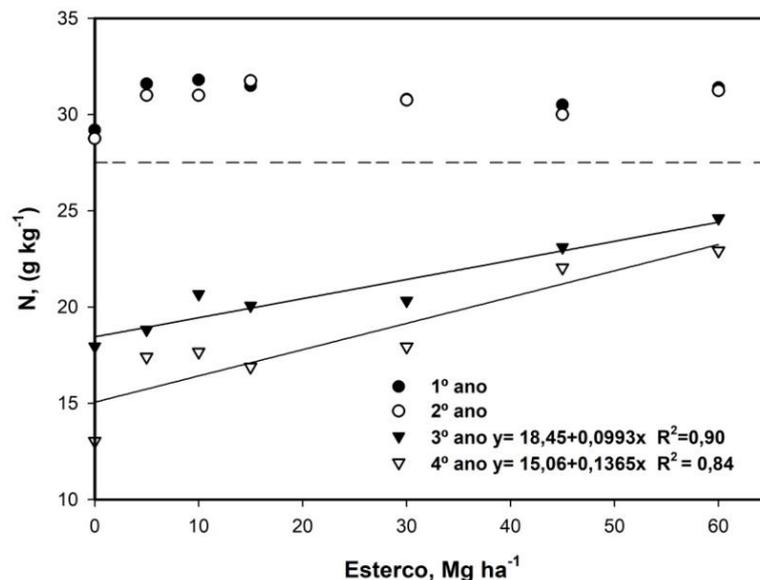


Figura 14. Teor de N nas folhas em função de doses de esterco bovino e de seu efeito residual.

A ausência de resposta significativa nas safras 2011/12 e 2012/13 pode estar relacionada ao status nutricional equilibrado neste órgão, sendo que os teores obtidos em ambos os anos foram maiores que nos demais (Tabela 12) e se encontram em níveis adequados, com base na faixa estabelecida por Raij e Cantarella et al. (1997), que tem como limites inferior e superior, respectivamente, 27,5 e 35,0 g kg<sup>-1</sup>. Por outro lado, nos dois anos de avaliação do efeito residual, os teores de N nas folhas estão abaixo dos níveis adequados, o que indica que o suprimento desse nutriente foi insuficiente, sendo que foi fornecido apenas pelo remanescente do esterco bovino aplicado nos dois primeiros anos. Estes baixos teores de N nas folhas nos dois últimos anos agrícolas podem ser explicados pelas taxas de mineralização e liberação do N orgânico presente no esterco bovino, que vão reduzindo à medida que se realizam novos cultivos, com taxas de 20, 10 e 5%, respectivamente para o segundo, terceiro e quarto ano após a aplicação, o que justifica também o menor teor de N obtido no quarto ano agrícola (Eghball e Power, 1999).

#### **4.4. Matéria seca e acúmulo de nitrogênio nas plantas de milho adubadas com esterco**

Houve aumento da produção de matéria seca e do N acumulado na matéria seca da parte aérea das plantas de milho com o aumento das doses de esterco (Tabela 13). Esses incrementos na matéria seca podem ser justificados devido ao maior aporte de N e ao efeito que este nutriente promove na morfologia da planta, particularmente associado ao aumento do índice de área foliar, que permite maior interceptação da radiação solar e incorporação do carbono atmosférico aos compostos carbônicos na planta, propiciando maiores acúmulos de matéria seca (França et al., 2011).

Os modelos de melhor ajuste aos dados de produção de matéria seca e de N acumulado estão na Figura 15. Verifica-se que as respostas do acúmulo de matéria seca à aplicação de esterco ocorreram com doses menores que 12 Mg ha<sup>-1</sup>, sendo que 90% dos incrementos na produção de matéria seca foram obtidos com 4,4; 11,7; 10,3 e 9,4 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente no primeiro, segundo, terceiro e quarto anos agrícolas.

Tabela 13. Efeito das doses de esterco bovino e de seu efeito residual na matéria seca e no acúmulo de N na parte aérea nas plantas de milho, nos anos agrícolas 2011/12 a 2014/15.

<b>Esterco (Mg ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>N no esterco (kg ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>2011/12</b>	<b>2012/13</b>	<b>2013/14</b>	<b>2014/15</b>
Matéria seca (kg ha <sup>-1</sup> )					
0	0	10.582	11.651	7.937	5.775
5	64	13.612	15.767	11.186	10.202
10	129	13.161	15.389	11.358	11.137
15	193	13.915	17.358	11.907	11.907
30	387	14.261	16.366	12.216	11.220
45	580	12.655	17.056	12.177	12.677
60	774	14.756	18.508	13.037	12.705
<b>Média</b>		13.277 B	16.013 A	11.405 C	10.803 C
P>F		0,030*	0,001**	0,001**	0,0001**
CV(%)		13,0	9,7	8,5	15,5
N acumulado (kg ha <sup>-1</sup> )					
0	0	102,7	120,0	32,0	49,2
5	64	140,9	184,0	74,3	72,2
10	129	148,3	204,0	83,1	81,5
15	193	147,8	237,0	97,5	81,3
30	387	143,1	238,0	77,1	81,6
45	580	133,8	246,0	102,0	87,9
60	774	161,8	253,0	144,7	99,1
<b>Média</b>		139,8 B	211,7 A	87,2 C	79,0 C
P>F		0,025*	0,001**	0,001**	0,004**
CV(%)		10,1	13,4	15,0	17,8

\*\* e \* - Significativos a 1% e 5 % de probabilidade, respectivamente, pelo teste F; Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, na linha, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

A relação entre as duas variáveis, matéria seca e N acumulado, foi direta, de modo que nos anos em que foram obtidas as maiores produções de matéria seca ocorreram os maiores acúmulos de N (Tabela 13). Observa-se, no entanto, a partir do segundo ano agrícola, maior variação no N acumulado do que na matéria seca, devido à adubação com esterco (Figura 15). Grande parte do aumento do N acumulado no primeiro ano agrícola ocorreu com aplicação de até 5,6 Mg ha<sup>-1</sup> de esterco, intervalo no qual se atingiu 90% da produção máxima. No segundo ano agrícola, o máximo acúmulo, 259,7 kg ha<sup>-1</sup>, foi obtido com a aplicação de 43 Mg ha<sup>-1</sup> de esterco bovino. Durante os anos de avaliação do efeito residual foram obtidas respostas lineares e acúmulos de N menores, sendo as quantidades acumuladas nos terceiro e quarto anos agrícolas, respectivamente iguais a 134 e 100 kg ha<sup>-1</sup> de

N, com aplicação de  $60 \text{ Mg ha}^{-1}$  de esterco, valores que representam incrementos em relação ao tratamento controle de 136 e 53%.

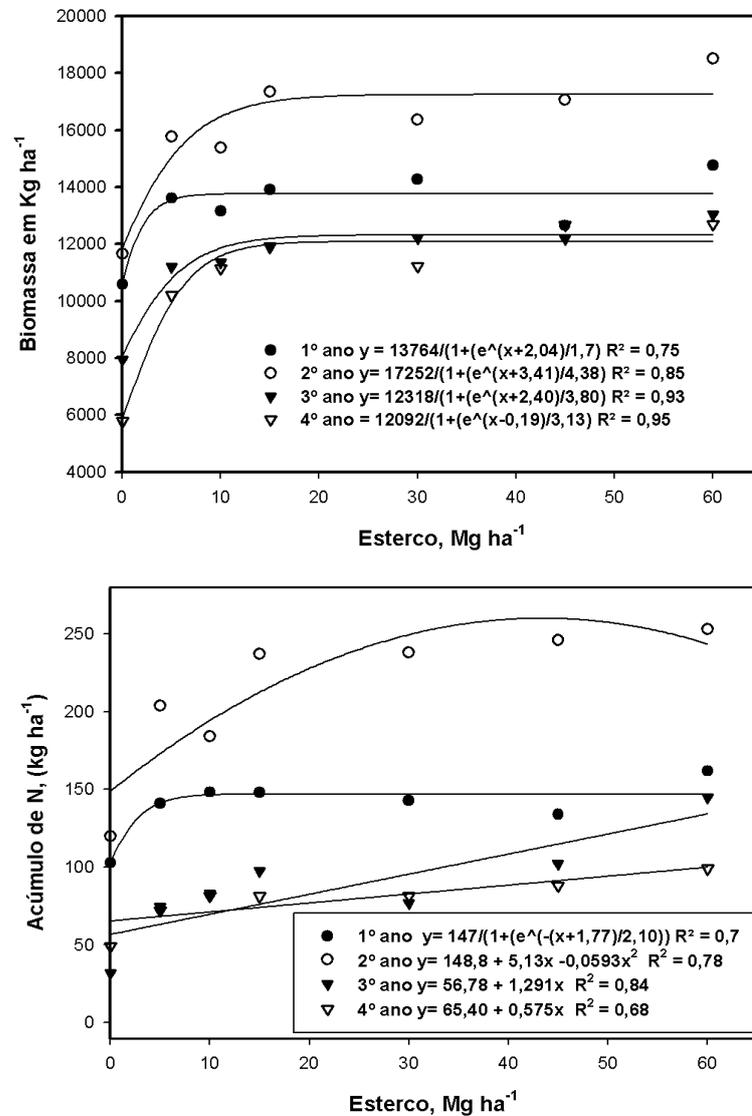


Figura 15. Acúmulo de matéria seca e de N na parte aérea das plantas de milho em função de doses de esterco bovino e de seu efeito residual.

A diferença de produção de matéria seca entre os dois primeiros anos agrícolas foi de  $2.736 \text{ kg ha}^{-1}$  (17%), maior no segundo ano (Tabela 13). Em relação ao N acumulado, as diferenças absoluta e percentual foram  $71,9 \text{ kg ha}^{-1}$  e 51%, ao comparar o mesmo período (Tabela 13). Este resultado está associado ao fato de que a maior parte do N presente no esterco bovino se encontra na forma orgânica, e admite-se, que apenas uma fração entre 20 a 40% do total aplicado é mineralizado

no ano de aplicação, sendo essa fração constituída por compostos de carbono mais lábeis (Klausner et al., 1994; Eghball e Power, 1999). O N presente nos compostos orgânicos mais complexos não é mineralizado tão rapidamente, permanece no solo por mais tempo e mineraliza nos anos subsequentes (Eghball e Power, 1999), condição que pode justificar os maiores acúmulos de matéria seca e de N na parte aérea no segundo ano de aplicação.

#### 4.5. Produtividade de grãos de milho

A aplicação de esterco bovino teve efeito na produção de grãos de milho tanto nos dois anos em que foi feita aplicação do insumo quanto nos dois anos em que se avaliou o seu efeito residual (Tabela 14 e Figura 16). No entanto, com o aumento das doses de esterco houve aumento no fornecimento de micronutrientes, e há expectativa de melhora nos atributos físicos do solo, que também influenciam na produção.

Tabela 14. Efeito da aplicação anual do esterco bovino (anos agrícolas 2011/12 e 2012/13) e efeito residual da aplicação (anos agrícolas 2013/14 e 2014/15) na produtividade de grãos.

Esterco (Mg ha <sup>-1</sup> )	Doses de N (kg ha <sup>-1</sup> )	Produtividade			
		2011/12	2012/13	2013/14	2014/15
		(kg ha <sup>-1</sup> )			
0	0	5.180	5.365	3.639	2.116
5	64	7.253	8.304	5.925	2.943
10	129	8.608	8.218	5.727	4.563
15	193	9.007	8.055	6.205	4.453
30	387	9.337	8.620	6.615	5.382
45	580	9.053	9.015	6.563	5.185
60	774	9.273	8.536	6.773	5.603
<b>Média</b>		8.244 A	8.016 A	5.921 B	4.320 C
<b>p&gt; F</b>		0,003**	0,001**	0,001**	0,001**
<b>CV (%)</b>		8,2	8,5	8,5	11,2

\*\* - Significativos a 1% de probabilidade pelo teste F;

Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, na linha, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

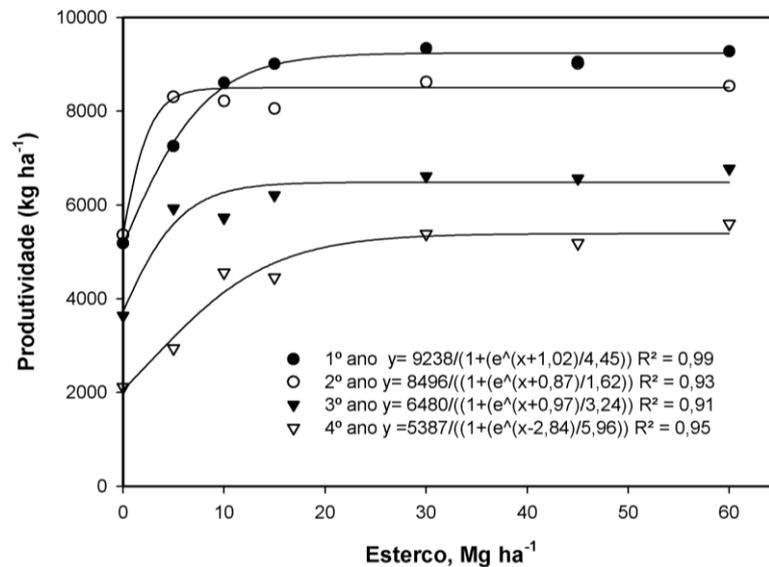


Figura 16. Produtividade de grãos de milho em função de doses de esterco bovino e de seu efeito residual.

Em função da baixa relação C/N do esterco e da sobreposição das doses no segundo ano agrícola, havia expectativa de maior produtividade de grãos nesse ciclo, haja vista que foram obtidos os maiores acúmulos de nitrogênio e de matéria seca na parte aérea nesta safra. No entanto, as produtividades médias do primeiro e segundo anos agrícolas não diferiram entre si (Tabela 14) e isso pode estar relacionado ao maior número de espigas por planta (dado não apresentado) no primeiro ano agrícola, e à ocorrência de doenças fúngicas (mancha foliar de *Phaeosphaeria* e ferrugem) no segundo ano agrícola.

Os incrementos na produtividade de grãos em função das doses de esterco bovino estão particularmente associados, como já comentado, ao aumento do fornecimento de N, que resultou em maior produção de matéria seca e maior acúmulo de N em relação ao tratamento controle. No entanto, o suprimento excessivo desse nutriente pode estimular o desenvolvimento vegetativo da parte aérea (Stark e Porter, 2005), em detrimento da utilização desses metabólitos para produção de grãos, conforme constatado no segundo ano agrícola (Tabelas 13 e 14).

A produtividade de grãos no terceiro ano agrícola ficou abaixo do esperado, devido aos baixos valores de precipitação (Figura 2), principalmente entre a segunda quinzena de janeiro e a primeira quinzena de fevereiro, em que o total precipitado foi

de apenas 70 mm e coincidiu com o período de enchimento de grãos da cultura. No quarto ano agrícola, ainda havia efeito residual da aplicação do esterco, como se constata pelo acúmulo de N na parte aérea, e grande parte dos incrementos na produtividade de grãos ocorreram entre as doses 0 e 30 Mg ha<sup>-1</sup>. O efeito residual do N fica evidente ao subtrair o N acumulado nas plantas dos tratamentos adubados com esterco do obtido no tratamento controle. Embora a relação C/N do esterco aplicado fosse baixa, parte do N pode estar em compostos de alta complexidade, cuja permanência no solo pode persistir por período maior do que o ano de aplicação, conforme demonstrado por Eghball e Power (1999), que determinaram taxas de mineralização de N do esterco bovino de 40%, 20% e 10%, respectivamente no ano de aplicação e nos dois anos seguintes.

Verificou-se, no período de aplicação de esterco, maiores produtividades de grãos (Tabela 14), sendo a média destas 59% maior do que a obtida no período de avaliação do efeito residual, o que corresponde a 3.009 kg ha<sup>-1</sup>. Mesmo em menores proporções, durante os anos de avaliação do efeito residual, houve efeito do N na produtividade de grãos, fato que comprova o valor desse insumo no fornecimento de N em longo prazo. No entanto, destaca-se o fato de terem sido empregadas doses de esterco de até 60 Mg ha<sup>-1</sup>, por dois anos, fato que contribuiu para maior persistência dos efeitos residuais.

Embora tenham sido aplicadas doses altas de N via esterco, não foram obtidas produtividades maiores do que 10.000 kg ha<sup>-1</sup>. Resultados semelhantes foram obtidos por Cancellier et al. (2011), que aplicaram 0, 10; 20; 30; 40; 50 e 60 Mg ha<sup>-1</sup> de esterco bovino e obtiveram, na maior dose, produtividade de grãos equivalente a 2.637 kg ha<sup>-1</sup>, abaixo das produtividades obtidas em todos os tratamentos, com exceção do tratamento controle no quarto ano agrícola em que a produtividade média foi de 2.116 kg ha<sup>-1</sup>. As diferenças nas respostas podem ser relacionadas às diferenças climáticas, sendo que os autores atribuem as baixas produtividades ao déficit hídrico no período de florescimento e de enchimento de grãos. Ainda, pode-se relacionar a qualidade do esterco e o modo de aplicação com as diferenças nas produtividades, sendo que o insumo utilizado no presente experimento apresentava teor de matéria orgânica de 31% e foi aplicado em área

total, enquanto que o teor de matéria orgânica do esterco utilizado por Cancellier et al. (2011) era de 7,3%, o que pode indicar menor concentração de N neste insumo.

#### 4.6. Créditos de nitrogênio

Com base nas produtividades de grãos obtidas no experimento com esterco bovino e nas curvas de resposta do milho às doses de ureia (Figura 17) foram calculados os créditos de N (Tabela 15). Os maiores créditos foram obtidos nos dois primeiros anos agrícolas. No primeiro e no segundo anos, os maiores créditos foram obtidos com as doses de 30 Mg ha<sup>-1</sup> e 45 Mg ha<sup>-1</sup>, e nos dois anos seguintes, de avaliação do efeito residual, verificaram-se os maiores valores na dose de 60 Mg ha<sup>-1</sup> (Tabela 15).

Os maiores créditos de N nos dois primeiros anos agrícolas estão relacionados às maiores produtividades obtidas nestes dois ciclos, resultado da adubação com esterco bovino e do maior aporte de N. Em contrapartida, os menores créditos de N nos anos de avaliação do efeito residual estão relacionados com as baixas produtividades de grãos, resultado do menor aporte de N, visto que as taxas de mineralização diminuem com o tempo e podem ser de aproximadamente 10% no terceiro ano após a aplicação (Eghball e Power, 1999).

Com base nos créditos de N pode-se inferir a quantidade de fertilizante nitrogenado que pode ser deduzida da adubação ao utilizar a respectiva quantidade de esterco bovino. No primeiro ano agrícola, por exemplo, utilizando 5 Mg ha<sup>-1</sup> de esterco bovino, pode-se deduzir da adubação de cobertura 33,6 kg de N; no segundo ano, a dedução para essa mesma dose seria maior, cerca de 62 kg ha<sup>-1</sup>, devido à sobreposição das doses, o que implica em aumento dos créditos devido a contribuição de N residual (Tabela 15).

Ao analisar a razão obtida entre a quantidade de N aplicada e os créditos de N obtidos (Tabela 15), verificam-se taxas de retorno maiores com doses menores, o que implica em maior aproveitamento do N aplicado. Esta relação representa a eficiência no aproveitamento de cada unidade de N aplicada, sendo que o maior aproveitamento ocorre nas doses de esterco menores, enquanto nas maiores doses, há aproveitamento bem menor, uma vez que aumentos expressivos nas doses são

acompanhados de pequenos aumentos na produtividade de grãos e, conseqüentemente, nos créditos de N.

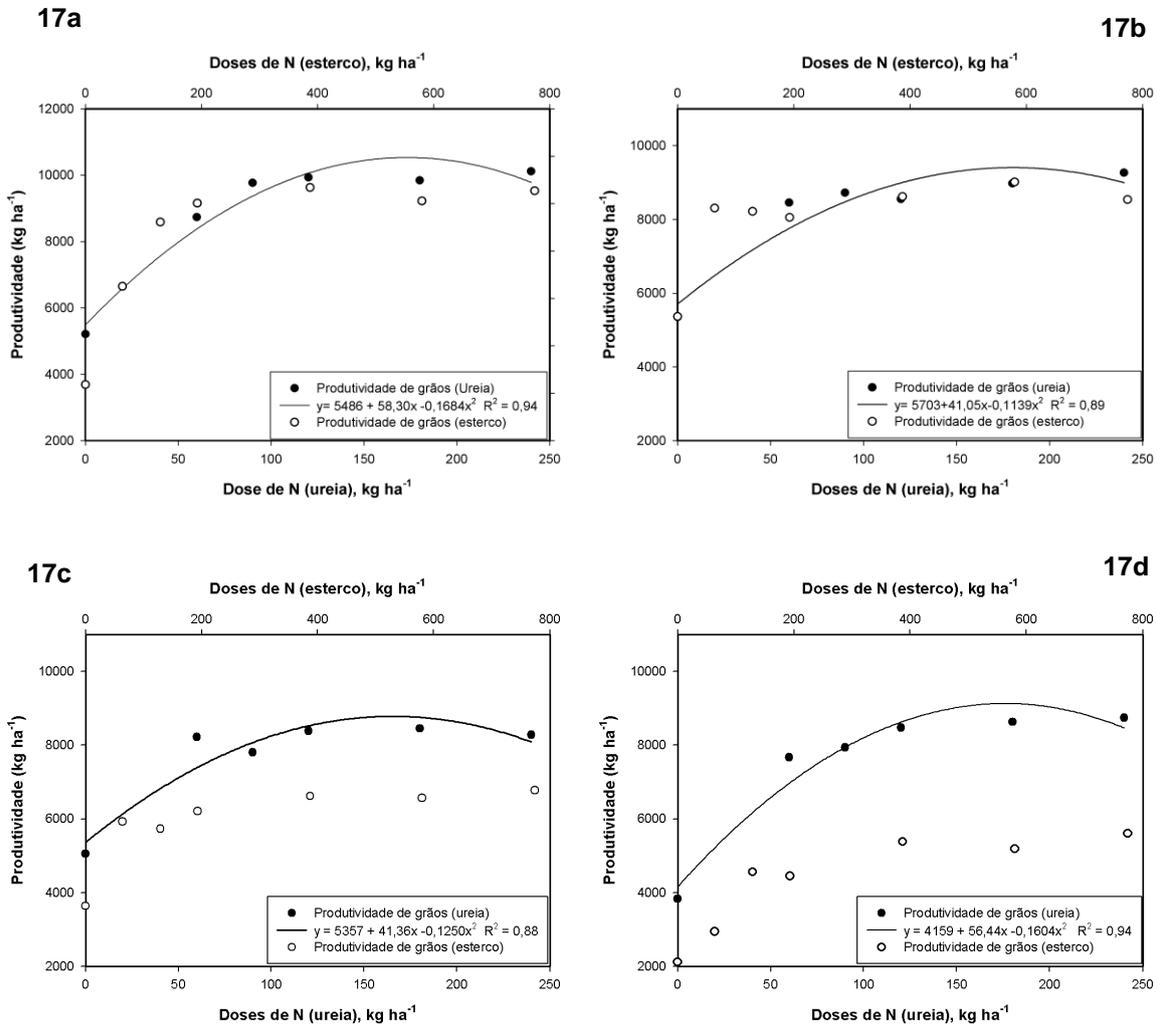


Figura 17. Curva de resposta da cultura do milho a doses de N no experimento cuja fonte foi ureia e produtividade de grãos com esterco bovino, no primeiro ano agrícola (17a), segundo ano agrícola (17b), terceiro ano agrícola (17c) e quarto ano agrícola (17d).

Os créditos de N obtidos no presente trabalho (Tabela 15) foram menores do que os obtidos por Nicholson et al. (2003), que trabalharam com doses de até 42 Mg ha<sup>-1</sup> de cama de frango e obtiveram créditos entre 33 e 265 kg ha<sup>-1</sup> para as culturas da beterraba açucareira e da batata. No entanto, a cama de frango apresenta maior teor de N do que o esterco bovino, e a proporção de N mineral (N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) nesse insumo também é maior do que a do esterco, o que faz com que o N da cama de frango seja disponibilizado mais rapidamente às plantas, justificando os maiores

créditos obtidos por esses autores. Com base nessas comparações, observa-se a relevância que o fator fonte do nutriente tem na determinação dos créditos de N, pois diferenças na composição química, aliadas com as formas de N no adubo e com o tratamento que recebeu antes da aplicação, conferem maior ou menor potencial de aproveitamento do N pela cultura e, conseqüentemente, de obtenção de créditos de N. Comparando adubos orgânicos, Schröder et al. (2013) verificaram os maiores créditos de N na seguinte sequência: esterco líquido suíno > esterco líquido bovino > concentrado mineral derivado da fração líquida do esterco > esterco bovino. Para os autores, os menores créditos de N obtidos com o esterco são decorrentes dos menores teores de N na forma amoniacal e dos altos teores de N-orgânico, fato que implica em disponibilização mais lenta desse nutriente no solo.

Tabela 15. Créditos de N advindos da aplicação de esterco bovino e de seu efeito residual e economia referente à aquisição de ureia com base nos créditos de N obtidos.

Esterco (Mg ha <sup>-1</sup> )	N no esterco (kg ha <sup>-1</sup> )	2011/12	2012/13	2013/14	2014/15	Total
----- Créditos (kg ha <sup>-1</sup> de N) -----						
5	64	33	62	14	0	109
10	129	66	78	9	7	153
15	193	78	71	22	5	171
30	387	89	97	34	23	220
45	580	79	122	32	19	233
60	774	87	93	39	28	219
-Economia referente à aquisição de ureia (R\$) -						
5	64	95	179	42	0	316
10	129	190	225	27	20	462
15	193	224	205	63	14	506
30	387	256	280	98	66	700
45	580	229	352	92	55	728
60	774	250	268	112	81	711

Considerando apenas os maiores créditos de N obtidos em cada ano (Tabela 15), pode-se deduzir da adubação nitrogenada o equivalente a 89 kg ha<sup>-1</sup> de N no primeiro ano agrícola, crédito obtido com a aplicação de 30 Mg ha<sup>-1</sup> de esterco bovino; 122 kg ha<sup>-1</sup> de N com o uso de 45 Mg ha<sup>-1</sup> de esterco bovino no segundo ano agrícola; 39 kg ha<sup>-1</sup> de N devido ao efeito residual na dose de 60 Mg ha<sup>-1</sup> de esterco bovino no terceiro ano agrícola, e 28 kg ha<sup>-1</sup> de N devido ao efeito residual do esterco na dose de 60 Mg ha<sup>-1</sup>. Com base nesses quantitativos, a economia gerada

seria de R\$256,00; R\$351,00; R\$112,00 e R\$80,00, respectivamente para o primeiro, segundo, terceiro e quarto anos agrícolas, considerando o custo de R\$1.297,00 para a aquisição de 1 tonelada de ureia (CEPEA, 2017).

Os demais valores referentes à economia na compra de fertilizantes nitrogenados para cada dose estão apresentados na Tabela 15, assim como a economia total proporcionada com o uso desse insumo. Salienta-se que em função do elevado custo dos fertilizantes nitrogenados e da baixa disponibilidade deste nutriente nos solos, mesmo pequenas contribuições de N provenientes do adubo orgânico, como as obtidas nos anos de avaliação do efeito residual, devem ser consideradas e deduzidas de adubações subsequentes. Desta forma, pode-se aumentar a eficiência de uso deste nutriente e propiciar ganho econômico para o agricultor (Nicholson et al., 2003).

A economia promovida pelo uso de esterco bovino não se restringe apenas ao N, uma vez que este insumo apresenta em sua composição todos os nutrientes de planta, o que torna o seu uso ainda mais atrativo. Além da economia inerente ao fornecimento de nutrientes, há ganhos nas questões relacionadas à qualidade do solo: matéria orgânica, agregação, porosidade, estrutura, densidade, retenção de água e CTC. A quantidade de matéria orgânica em solos de regiões tropicais geralmente é muito baixa, mas, mesmo assim, ela responde por até 80% da CTC dos solos destas regiões (Bhogal et al., 2009; Yagüe et al., 2016). Com seu aumento há ganho no potencial de armazenamento de nutrientes no solo e maior controle de perdas por lixiviação.

## 5. CONCLUSÕES

Houve melhoria nos atributos químicos do solo pela aplicação de esterco bovino, e a duração dos efeitos foi variável, de modo que para os nutrientes (P, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> e K<sup>+</sup>) houve efeito residual e para as variáveis relativas à acidez do solo (pH e H+Al) o efeito não persistiu após a interrupção da aplicação.

O teor de carbono orgânico do solo aumentou linearmente com o aumento das doses de esterco, o que levou ao aumento no diâmetro médio dos agregados e na macroporosidade, e diminuição na densidade, mesmo após a interrupção da aplicação do esterco por dois anos e em solo manejado de forma mecânica anualmente.

A aplicação de até 60 Mg ha<sup>-1</sup> de esterco bovino durante dois anos consecutivos propiciou aumentos na produtividade de grãos de milho nos dois anos de aplicação e nos dois anos de avaliação do efeito residual, sendo que a produtividade média nos anos de aplicação de esterco foi 59% maior.

Os créditos de N devidos à aplicação de esterco bovino variaram de 5 a 122 kg ha<sup>-1</sup> de N considerando aplicação e efeito residual do adubo, e os maiores créditos foram obtidos com a aplicação de 30, 45, 60 e 60 t ha<sup>-1</sup>, respectivamente no primeiro, segundo, terceiro e quarto anos de avaliações.

## 6. REFERÊNCIAS

- ALCARDE JC (Eds.) (2009) Manual de análise de fertilizante. Piracicaba: Fealq, 259p.
- ANDRIOLI I, CENTURION JF (1999) Levantamento detalhado dos solos da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS DO SOLO, **Anais...** Brasília: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 1 CD-ROM.
- ANO AO, UBOCHI CI (2007) Neutralization of soil acidity by animal manures: mechanism of reaction. **African Journal of Biotechnology** 6:364-368.
- ARAÚJO LAN, FERREIRA ME, CRUZ, MCP (2004) Adubação nitrogenada na cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 39: 771-777.
- ASAGI N, UENO H (2009) Nitrogen dynamics in paddy soil applied with various <sup>15</sup>N-labelled green manures. **Plant and Soil** 322:251–262.
- BABALOLA OA, ADESODUM JK, OLASANTAN FO, ADEKUNLE AF (2012) Responses of some soil biological, chemical and physical properties to short-term compost amendment. **International Journal of Soil Science** 7:28-38.
- BARRAL MT, ARIAS M, GUÉRIF J (1998) Effects of iron and organic matter on the porosity and structural stability of soil aggregates. **Soil & Tillage Research** 46:261-272.
- BAYER C, MIELNICZUK J (2008) Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS GA, SILVA LS, CANELLAS LP, CAMARGO FAO (Ed.) **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Metrópole, p. 7-18.
- BENKE MB, HAO X, O'DONOVAN JT, CLAYTON GW, LUPWAYI NZ, CAFFYN P, HALL M (2010) Livestock manure improves acid soil productivity under a cold northern Alberta climate. **Canadian Journal of Soil Science** 90:685-697.
- BHOGAL A, NICHOLSON FA, CHAMBERS BJ, (2009) Organic carbon additions: effects on soil bio-physical and physico-chemical properties. **European Journal of Soil Science** 90:276-286.
- BLAKE GR, HARTGE KH (1986) Bulk density. In: KLUTE A. (Eds.) **Methods of soil analysis**. Madison: American Society of Agronomy, p. 365-375.

BRAOS LB, CRUZ MCP, FERREIRA ME, KUHNEN F (2015) Organic phosphorus fractions in soil fertilized with cattle manure. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 39:140-150.

CANCELLIER LL, AFFÉRI FS, ADORIAN GC, RODRIGUES HVM, MELO AV, PIRES LPM, CANCELLIER EL (2011) Adubação orgânica na linha de semeadura no desenvolvimento e produtividade do milho. **Semina: Ciências Agrárias** 32:527-540.

CANTARELLA H, RAIJ BVan, CAMARGO CEO (1997) Cereais. In: RAIJ BVan, CANTARELLA H, QUAGGIO JA (Eds.) **Recomendação de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: IAC, p. 45-71.

CARMO CAFS, ARAUJO WS, BERNARDI ACC, SALDANHA MFC (Eds.) (2000) Métodos de análise de tecidos vegetais utilizados na Embrapa Solos. Rio de Janeiro: EMBRAP, p. 47.

CASTRO PHM, VENDRAME PRS, PINESE JPP (2014) Mineralogia da fração argila de solos localizados em ilhas no alto Rio Paraná, PR/MS. **Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas** 35:181-188.

CASTRO FILHO C, LOURENÇO A, GUIMARÃES MDF, FONSECA ICB (2002) Aggregate stability under different soil management systems in a Red Latosol in the state of Paraná, Brazil. **Soil and Tillage Research** 65:45-51.

CASTRO FILHO C, MUZILLI O, PODANOSCHI AL (1998) Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico num Latossolo Roxo distrófico, em função de sistema de plantio, rotações de culturas e métodos de preparo das amostras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 22:527-538.

CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA – CEPEA. **Custos trimestrais dos grãos**, Piracicaba, ano 10, edição 21, 2017. p. 1-8. Disponível em: <http://www.cepea.esalq.usp.br/upload/revista/pdf/0436302001489434163.pdf>. Acesso em 19/07/2017>.

CHANG C., SOMMERFELDT TG, ENTZ T (1990) Rates of soil chemical changes with eleven annual applications of cattle feedlot manure. **Canadian journal of Soil Science** 70:673-681.

CHANGE C, JANZEN HH (1996) Long-term fate of nitrogen from anual feedlot manure applications. **Journal of Environmental Quality** 25:785-790.

CLAESSEN MEC (Eds.) (1997) Manual de métodos e análise de solo. Rio de Janeiro: Embrapa-CNPS, 212p.

COBUCCI T (1991) **Efeitos de doses e épocas de aplicação em cobertura do adubo nitrogenado no consórcio milho-feijão**. 94 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB (2017) **Acompanhamento da Safra Brasileira**, Brasília, v. 4, p. 1-166. Disponível em: <[http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/17\\_02\\_16\\_11\\_51\\_51\\_boletim\\_graos\\_fevereiro\\_2017.pdf](http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/17_02_16_11_51_51_boletim_graos_fevereiro_2017.pdf)>. Acesso em 05 de março de 2017>.

CORRÊA JC, BULL LT, CRUSCIOL CAC, MORAES MH (2009) Alteração de atributos físicos em Latossolo com aplicação superficial de escória de aciaria, lama cal, lodos de esgoto e calcário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 33: 263-272.

DARCH T, BLACKWELL MSA, HAWKINS JMB, HAYGARTH PM, CHADWICK DA (2014) meta-analysis of organic and inorganic phosphorus in organic fertilizers, soils and water: implications for water quality. **Crit. Rev. Environ. Sci. Technol** 44:2172-2202.

DARILEK J L, HUANG B, LI DC, WANG ZG, ZHAO YC, SUM WX, SHI XZ (2010) Effect of land use conversion from rice paddies to vegetable fields on soil phosphorus fractions. **Pedosphere** 20:137-145.

DING W, HUME DJ, VYN TJ, BEAUCHAMP EGN (1997) credit of soybean to a following corn crop in central Ontario. **Canadian Journal of Plant Science** 78:29-33.

EGHBALL B (2003) Leaching of Phosphorus Fractions Following Manure or Compost Application. **Soil Science and Plant Analysis** 34:2803–2815. Disponível em: <DOI: 10.1081/CSS-120025207>.

EGHBALL B (1999) Liming effects of beef cattle manure or compost. **Communications in Soil Science and Plant Analysis** 30:2563-2570.

EGHBALL B (2002) Soil properties as influenced by phosphorus- and nitrogen-based manure and compost applications. **Agronomy Journal** 94:128–135.

EGHBALL B, GINTING D, GILLEY JE (2004) Residual effects of manures and compost application on corn production and soil properties. **Agronomy Journal** 96:442-447.

EGHBALL B, POWER JF (1999) Phosphorus and nitrogen-based manure and compost application: Corn production and soil phosphorus. **Soil Science Society American Journal** 63:895–901.

EGHBALL B, WIENHOLD BJ, GILLEY JE, EIGENBERG RA (2002) Mineralization of Manure Nutrients. **Journal of Soil and Water Conservation** 57:469-473.

EGHBALL B, SHANAHAN JF, VARVEL GE, GILLEY JE (2003) Reduction of high soil test phosphorus by corn and soybean varieties. **Agronomy Journal** 95:1233-1239.

EGUCHI ES, CECATO U, MUNIZ AS, MARI GC, MURANO RAC, NETO ELS (2016) Physical and chemical changes in soil fertilized with poultry manure with and without chiseling. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** 20:316-321.

ERNANI PR, BAYER C, ALMEIDA JÁ, CASSOL PC (2007) Mobilidade vertical de cátions influenciada pelo método de aplicação de cloreto de potássio em solos com carga variável. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 31:393-402.

FERNANDES FCS, BUZETTI S, ARF O, ANDRADE JAC (2005) Doses, eficiência e uso de nitrogênio por seis cultivares de milho. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo** 4:195-204.

FERREIRA ACB, ARAÚJO GAA, PEREIRA PRGP, CARDOSO AA (2001) Características agronômicas e nutricionais do milho adubado com nitrogênio, molibdênio e zinco. **Scientia Agricola** 58:131-138.

FERREIRA DF (2003) Sisvar versão 5.0 (Biud 66). Sistemas de análises de variância para dados balanceados: **Programa de análises estatísticas e planejamento de experimentos**. Lavras, Universidade Federal de Lavras.

FORNASIERI FILHO D (Eds.) (2007) A cultura do milho. Jaboticabal: FUNEP, 576p.

FRANÇA S, MIELNICZUK J, ROSA LMG, Bergonci JI (2011) Nitrogênio disponível ao milho: Crescimento, absorção e rendimento de grãos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** 15:1143–1151.

GENTRY LE, BELOW FE, DAVID MB, BERGEROU JA (2001) Source of the soybean N credit in maize production. **Plant and Soil** 236:175-184.

GILLEY JE, EGBALL B (2002) Residual effects of compost and fertilizer applications on nutrients in runoff. **American Society of Agricultural Engineers** 45:1905–1910.

HAYNES RJ, MOKOLOBATE MS (2001) Amelioration of Al toxicity and P deficiency in acid soils by additions of organic residues: a critical review of the phenomenon and the mechanisms involved. **Nutrient Cycling in Agroecosystems** 59:47-63.

HAYNES RJ, NAIDU R (1998) Influence of lime, fertilizer and manure application on soil organic matter content and soil physical conditions: A review. **Nutrient Cycling in Agroecosystem** 51:123-137.

HAYNES RJ, SWIFT RS (1990) Stability of soil aggregates in relation to organic constituents and soil water content. **European Journal of Soil Science** 41:73-83.

HOU X, WANG X, LI R, JIA Z, LIANG L, WANG J, NIE J, CHEN X, WANG Z (2012) Effects of different manure application rates on soil properties, nutrient use, and crop yield during dryland maize farming. **Soil Research** 50:507–514.

HUE NV, LICUDINE DL (1999) Amelioration of subsoil acidity through surface application of organic manures. **Journal of Environmental Quality** 28:623–632.

JASTROW JD, MILLER RM (1998) Soil aggregate stabilization and carbon sequestration: feedbacks through organomineral associations. In: LAL R, KIMBLE JM, FOLLETT RF, STEWART BA. (Eds.) **Soil Processes and the Carbon Cycle**. Boca Raton: CRC Press, p. 207–223.

KLAUSNER SD, KANNEGANTI VR, BOULDIN DR (1994) An approach for estimating a decay series for organic nitrogen in animal manure. **Agronomy Journal** 86:897–903.

KLEIN VA, LIBARDI PL, SILVA AP (1998) Resistência mecânica do solo à penetração sob diferentes condições de densidade e teor de água. **Engenharia Agrícola** 18:45-54.

LEMAIRE G, GASTAL FN (1997) N uptake and distribution in plant canopies. In: LEMAIRES G (Eds.) **Diagnosis of the nitrogen status in crops**. Berlin: Springer, p. 1-56.

Li JT, Zhong XL, Wang F, Zhao QG (2011) Effect of poultry litter and livestock manure on soil physical and biological indicators in a rice-wheat rotation system. **Plant Soil and Environment** 57:351–356.

LORY JA, RUSSELLE MP, PETERSON TA (1995) A comparison of two Nitrogen Credit Methods: Traditional vs. Difference. **Agronomy Journal** 87:648-651.

LYNCH JM, BRAGG E (1985) Microorganisms and soil aggregate stability. **Advances in Soil Science** 2:133-171.

MA BL, SUBEDI KD, COSTA C (2005) Comparison of crop-based indicators with soil nitrate test for corn nitrogen requirement. **Agronomy Journal** 97:462-471.

MALLORY EB, GRIFFIN TS, PORTER GA (2010) Seasonal nitrogen availability from current and past applications of manure. **Nutrient Cycling Agroecosystems** 88:351–360.

MELO LCA, SILVA CA, DIAS BO (2008) Caracterização da matriz orgânica de resíduos de origens diversificadas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 32:101-110.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. Instrução Normativa SDA nº 25, de 23 de julho de 2009. Dispõe sobre as normas sobre as especificações e as garantias, as tolerâncias, o registro, a embalagem e a rotulagem dos fertilizantes orgânicos simples, mistos, compostos, organominerais e biofertilizantes destinados à agricultura. Brasília, DF, 28 jul. 2009.

MILLER JJ, SWEETLAND NJ, CHANG C (2002) Soil physical properties of a Chernozemic clay loam after 24 years of beef cattle manure application. **Canadian Journal of Soil Science** 82:287-296.

NARAMABUYE FX, HAYNES RJ (2006) Short-term effects of three animal manures on soil pH and Al solubility. **Australian Journal of Soil Research** 44:515-521.

NICHOLSON F A, CHAMBERS BJ, DAMPNEY PMR (2003) Nitrogen value of poultry litter applications to roop crops and following cereal crops. **Journal of Agricultural Science** 140:53-64.

OADES JM (1993) The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure. **Geoderma** 56:377-400.

OLIVEIRA HJ, ERNANI PR, AMARANTE VT (2002) Alteração na composição química das fases sólida e líquida de um solo ácido pela aplicação de calcário e gesso agrícola. **Revista de Ciências Agroveterinárias** 1:93-101.

OLIVEIRA JMS, CAIRES EF (2003) Adubação nitrogenada em cobertura para o milho cultivado após aveia preta no sistema plantio direto. **Acta Scientiarum. Agronomy** 25:351-357.

OURIVES OEA, SOUZA GM, TIRITAN CS, SANTOS DH (2010) Fertilizante orgânico como fonte de fósforo no cultivo inicial de brachiaria brizantha cv. Marandú. **Pesquisa Agropecuária Tropical** 40:126-132.

PAGLIAI M, VIGNOZZI N, PELLEGRINI S (2004) Soil structure and the effect of management practices. **Soil & Tillage Research** 79:131-143.

PAUL JW, BEAUCHAMP EG (1993) Nitrogen availability for corn in soils amended with urea, cattle slurry, and solid and composted manures. **Canadian Journal of Soil Science** 73:253-266.

PRATT PF, BROADBENT FE, MARTIN P (1973) Using organic wastes as nitrogen fertilizers. **California Agriculture** 27:10-13.

RAIJ B.van, CANTARELLA H (1997) Outras culturas industriais. In: RAIJ B.van, CANTARELLA H, QUAGGIO JÁ, FURLANI AMC (Eds.) **Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, p. 233-239.

RAIJ B.van, ANDRADE JC, CANTARELLA H, QUAGGIO JÁ (2001) **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, p. 240-261.

REDDY K, OVERCASH MR, KHALEAL R, WESTERMAN PW (1980) Phosphorus sorption-desorption characteristics of two soil utilized for disposal of manure. **Journal of Environmental Quality** 9:86-92.

REICHERT JM, REINERT DJ, BRAIDA JÁ (2003) Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência & Ambiente** 14:29-48.

SCHRÖDER JJ, DE VISSER W, ASSINCK FBT, VELTHOF GL (2013) Effects of short-term nitrogen supply from livestock manures and cover crops on silage maize production and nitrate leaching. **Soil Use and Management** 29:151–160.

SCHRÖDER JJ, UENK D, HILHORST GJ (2007) Long-term nitrogen fertilizer replacement value of cattle manures applied to cut grassland. **Plant Soil** 299:83–99.

SIMANSKY V (2012) Soil structure stability and distribution of carbon in waterstable aggregates in different tilled and fertilized haplic luvisol soil structure stability and distribution of carbon in waterstable aggregates in different tilled and fertilized haplic Luvisol. **Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis** 20:173-178.

SIX J, FELLER C, DENEK K, OGLE S, SÁ JCM, ALBRECHT (2002) A. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils-Effects of no-tillage. **Agronomie** 22:755-775.

SKJEMSTAD JO, JANIK LJ, HEADS MJ, MCCLURE SG (1993) High energy ultraviolet photo-oxidation, a novel technique for studying physically protected organic matter in clay- and silt-sized aggregates. **Journal of Soil Science** 44:485-499.

SOMMERFELDT TG, CHANG C (1985) Changes in Soil Properties Under Annual Applications of Feedlot Manure and Different Tillage Practices. **Soil Science Society American Journal** 49:983-987.

STARK JC, PORTER GA (2005) Potato Nutrient Management in Sustainable Cropping Systems. **American Journal of Potato Research** 82:329-338.

STEVENSON FJ, VANCE G F (1989) Naturally occurring aluminium – organic complexes. In: Sposito G (Ed.) **The Environmental Chemistry of Aluminium**. Boca Raton: CRC Press, p. 117-146.

TANG C, SPARLING CP, MC LAY CDA, RAPHAEL C (1999) Effect on short-term residue decomposition on soil acidity. **Australian Journal of Soil Research** 37:591-594.

TISDALL JM, OADES JM (1982) Organic matter and water-stable aggregates in soils. **Journal of Soil Science** 33:141-163.

TORMENA CA, BARBOSA MC, COSTA ACS, GONÇALVES ACA (2002) Densidade, porosidade e resistência à penetração em Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo. **Scientia Agricola** 59:795-801.

TRIPATHI R, NAYAK AK, BHATTACHARYYA P, SHUKLA AK, SHAHID M, RAJA R, PANDA BB, MOHANTY S, KUMAR A, THILAGAM VK (2014) Soil aggregation and distribution of carbon and nitrogen in different fractions after 41 years long-term fertilizer experiment in tropical rice–rice system. **Geoderma** 213:280-286.

TSUTIYA MT, COMPARINI JB, ALEM SOBRINHO P, HESPANHOL I, CARVALHO PCT, MELFI AJ, MELO WJ, MARQUES MO (2002) **Biossólidos na agricultura**. São Paulo: ABES, 468p.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE-USDA. **World Agricultural Supply and Demand Estimates**, Washington, p. 1-40. Disponível em: <<https://www.usda.gov/oce/commodity/wasde.pdf>>. Acesso em: 10 de mar. 2017.

URIBELARREA M, CRAFTS-BRANDNER SJ, BELOW FE (2009) Physiological N response of field-grown maize hybrids (*Zea mays* L.) with divergent yield potential and grain protein concentration. **Plant and Soil** 316:151-160.

WHALEN JK, CHANG C, CLAYTON GW, CAREFOOT JP (2000) Cattle manure can increase the pH of acid soils. **Soil Science Society of America Journal** 64:962-966.

YAGÜE MR, DOMINGO-OLIVÉ F, BOSCH-SERRA AD, POCH RM, BOIXADERA J (2016) Dairy cattle manure effects on soil quality: porosity, earthworms, aggregates and soil organic carbon fractions. **Land Degradation & Development** 27:1753-1762.

YODER RE (1936) A direct method of aggregate analysis of soil and a study of the physical nature of erosion losses. **Journal of America Society of Agronomy** 28:337-357.

ZEBARTH BJ, DRURY CF, TREMBLAY N, CAMBOURIS AN (2008) Opportunities for improved fertilizer nitrogen management In production of arable crops in eastern Canada: a review. **Canadian Journal of Soil Science** 89:113-132.

ZIMMER M (2002) Is decomposition of woodland leaf litter influenced by its species richness? **Soil Biology & Biochemistry** 34:277-284.